

Politechnika Śląska

Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki

Rozprawa doktorska

Metody automatycznej analizy asymetrii grzbietu oraz krzywizn przednio-tylnych
kręgosłupa do wczesnego wykrywania skolioz w ramach systemu do przesiewowych badań
wad postawy dzieci i młodzieży

Autor

mgr inż. Daniel Feige

Promotor

dr hab. inż. Adam Ziębiński, profesor PŚ
Katedra Systemów Rozproszonych i Urządzeń Informatyki

Promotor pomocniczy

prof. dr hab. inż. Janusz Jeżewski
Centrum Inżynierii Biomedycznej
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Krakowski Instytut Technologiczny

Gliwice, 2025

Politechnika Śląska

Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki

Dyscyplina naukowa: Informatyka techniczna i telekomunikacja

Praca zrealizowana w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy” finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Pragnę serdecznie podziękować:

*Promotorowi pracy **dr hab. inż. Adamowi Ziębińskiemu, prof. PŚ,**
za zaangażowanie, fachową pomoc w realizacji pracy,
wsparcie merytoryczne oraz mnóstwo poświęconego czasu.
Bez Pańskiego uporu i cierpliwości ta praca by nie powstała.*

*Opiekunowi pomocniczemu **prof. dr. hab. inż. Januszowi Jeżewskiemu**
za nieocenione wsparcie merytoryczne, zaangażowanie i życzliwość podczas realizacji pracy.*

*Nieformalnemu promotorowi pracy - **dr hab. med. Markowi Kluszczyńskiemu,** lekarzowi z powołania
oraz z mnóstwem innowacyjnych pomysłów - pomysłodawcy ortometru i jego zastosowania.*

*Dyrektorowi Instytutu Techniki i Aparatury Medycznej ITAM - **dr hab. inż. Januszowi Wróblowi** za
możliwość uczestniczenia w programie „Doktoratu Wdrożeniowego”.*

*Moim współpracownikom w **Centrum Inżynierii Biomedycznej w Zabrze,** Sieci Badawczej Łukasiewicz -
Krakowskiego Instytutu Technologicznego, przede wszystkim Dyrektorowi CIB **dr inż. Aleksandrowi**
Sobotnickiemu za życzliwą pomoc i wsparcie,
kolegom z zespołu projektowego:*

***Ewelinie Sobotnickiej, Andrzejowi Michnikowi, Grzegorzowi Nowakowi, Romanowi Seredyńskiemu**
oraz **Mariuszowi Sobiechowi** za owocną współpracę podczas realizacji projektu,*

***Ilonie Karpziel** za pomoc w publikacji,*

***Michałowi Danikiewiczowi** za wsparcie w realizacji modułu wizualizacji 3D,*

***Michałowi Wojcikowi** za pomoc w konstrukcji stanowiska pomiarowego.*

*Szczególne podziękowania należą się **Andrzejowi i Ewelinie** - bez Waszej pomocy ta praca również nigdy
by nie powstała.*

Pracę dedykuję:

***Rodzicom, Sylwii, Łukaszowi** oraz oczywiście moim **dzieciom** - członkom KaKaKaKlan.*

Streszczenie

Rozprawa doktorska, mająca charakter wdrożeniowy, prezentuje opracowanie systemu do przesiewowych badań wad postawy dzieci i młodzieży przeznaczonego do wczesnego wykrywania skolioz, składającego się z aplikacji programowej ORT oraz rozwiązania sprzętowego ORT-100, przeznaczonych do automatycznej analizy asymetrii grzbietu oraz krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa.

Praca zawiera opis metod i technologii do diagnozy skoliozy używanych współcześnie oraz w przeszłości. Opisano w niej na czym polegają badania przesiewowe dzieci i młodzieży we wczesnej detekcji skoliozy. Szczegółowo opisano ideę pomiaru kąta rotacji tułowia z wykorzystaniem skoliometru oraz jego elektronicznych wersji. Przedstawiono w niej także model badania postawy ciała z wykorzystaniem ortometru.

Autor opisał przebieg oraz wyniki badań przeprowadzonych na trzech stanowiskach badawczych:

- stanowisku obrotowym układu akcelerometru,
- stanowisku obrotowym ortometru,
- stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji.

Badania miały na celu wykorzystanie znanych metod regresji oraz opracowanie metod zwiększających dokładność pomiarów kąta na bazie wskazań z akcelerometru i żyroskopu dla urządzenia ortometr. W ramach przeprowadzonych badań do estymacji pomiarów zastosowano metody regresji wielomianowych i oraz algorytmów uczenia maszynowego z użyciem sieci neuronowych, z wykorzystaniem lasu losowego i algorytmu K najbliższych sąsiadów. Zastosowanie tych metod umożliwiło znaczną redukcję błędów pomiarowych, których wartości zależne były od prędkości obrotowych. Badania pozwoliły dodatkowo na poprawę zastosowanego w ortometrze pomiaru długości odcinka kręgosłupa.

W pracy przedstawiono metody przeznaczone do automatycznego wyznaczania asymetrii grzbietu oraz krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa. Metody te bazują na pomiarach z ortometru. W powiązaniu z parametrami wpisywanymi do ankiet wypełnianych przez personel medyczny pokazano ich zastosowanie w systemie eksperckim. Do opracowania systemu wykorzystano kliniczne reguły decyzyjne do wyznaczenia grupy ryzyka wystąpienia skoliozy idiopatycznej oraz rodzaju wad postawy na bazie eksperckiego drzewa decyzyjnego.

Zaprezentowano wyniki wdrożenia opracowanych metod w systemie do automatycznej analizy asymetrii grzbietu i krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa. Szczegółowo opisano założenia projektowe oraz wymagania normatywne dla systemu ORT, precyzujące proces projektowania oraz rozwoju oprogramowania. Przedstawiono elementy systemu oraz przebieg i wyniki badań w ośrodku rehabilitacji.

Abstract

This implementation-oriented doctoral dissertation presents the development of a system for screening postural defects in children and adolescents, intended for the early detection of scoliosis. The system comprises the ORT software application and the ORT-100 hardware solution, designed for the automated analysis of back asymmetry and the sagittal (anteroposterior) curvatures of the spine.

The dissertation provides an overview of methods and technologies used for scoliosis diagnosis both in contemporary practice and historically. It explains the principles of screening examinations in children and adolescents in the context of early scoliosis detection. The concept of measuring the angle of trunk rotation using a scoliometer, including its electronic variants, is discussed in detail. In addition, a model for postural assessment employing an orthometer is presented.

The author describes the procedure and results of studies conducted at three experimental setups:

- a rotational test stand for the accelerometer system,
- a rotational test stand for the orthometer,
- a measurement stand for length and rotation-angle measurements.

The studies aimed to apply established regression methods and to develop approaches that increase the accuracy of angle measurements based on accelerometer and gyroscope readings for the orthometer device. For measurement estimation, polynomial regression methods were employed, as well as machine-learning algorithms, including neural networks, the random forest method, and the k-nearest neighbors (K-NN) algorithm. The application of these methods enabled a substantial reduction in measurement errors whose magnitudes depended on the rotational velocities. In addition, the studies facilitated improvements to the spinal-segment length measurement implemented in the orthometer.

The dissertation presents methods for the automated determination of back asymmetry and sagittal spinal curvatures, based on orthometer measurements. In conjunction with parameters entered into questionnaires completed by medical personnel, their application within an expert system is demonstrated. The system was developed using clinical decision rules to identify the risk group for idiopathic scoliosis and to determine the type of postural defects on the basis of an expert decision tree.

The results of implementing the developed methods in a system for automated analysis of back asymmetry and sagittal spinal curvatures are presented. The dissertation describes in detail the design assumptions and normative requirements for the ORT system, specifying the process of software design and development. It also presents the system components as well as the course and results of studies carried out at a rehabilitation center.

SPIS TREŚCI

Streszczenie	7
Abstract	9
1 Wstęp.....	15
1.1 Cel i zakres pracy	16
1.2 Hipotezy pracy	17
2 Analiza zagadnienia	20
2.1 Przegląd metod i technologii używanych do diagnozy skoliozy	20
2.1.1 Tradycyjne metody pomiaru stopnia skrzywienia kręgosłupa.....	20
2.1.2 Obrazowanie topografii powierzchni i ocena deformacji kręgosłupa.....	23
2.1.3 Metoda MORY	24
2.1.4 Metody obrazowania i oceny skoliozy przy użyciu radiografii	26
2.1.5 Metoda obrazowania i oceny skoliozy przy użyciu rezonansu magnetycznego (MRI)	26
2.1.6 Tomografia komputerowa (TK)	29
2.1.7 Sztuczna inteligencja jako metoda wykrywania skoliozy	29
2.1.8 Sieci neuronowe i głębokie uczenie	31
2.1.9 Algorytm automatycznego pomiaru kąta Cobba w skoliozie oparty na głębokim uczeniu	32
2.1.10 Bazy danych zawierające obrazy kręgosłupa/skoliozy dostępne bezpłatnie	34
2.2 Rola badań przesiewowych dzieci i młodzieży we wczesnej detekcji skoliozy	38
2.2.1 Zasady i cele badań przesiewowych	40
2.2.2 Przesiewowe programy badań skoliozy w Polsce i na świecie	42
2.2.3 Korzyści z wczesnej diagnozy skoliozy	45
2.2.4 Wyzwania związane z implementacją badań przesiewowych	46
2.3 Skoliometr Bunnella i jego elektroniczne wersje.....	49
2.4 Model badania postawy ciała AFAB z wykorzystaniem ortometru	57
2.4.1 Pomiar ATR w teście Adamsa	59
2.4.2 Pomiary kątowe obręczy kończyn dolnych.....	59
2.4.3 Ocena krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa w płaszczyźnie strzałkowej	60
2.4.4 Skala Beighton’a wiotkości stawowej.....	61

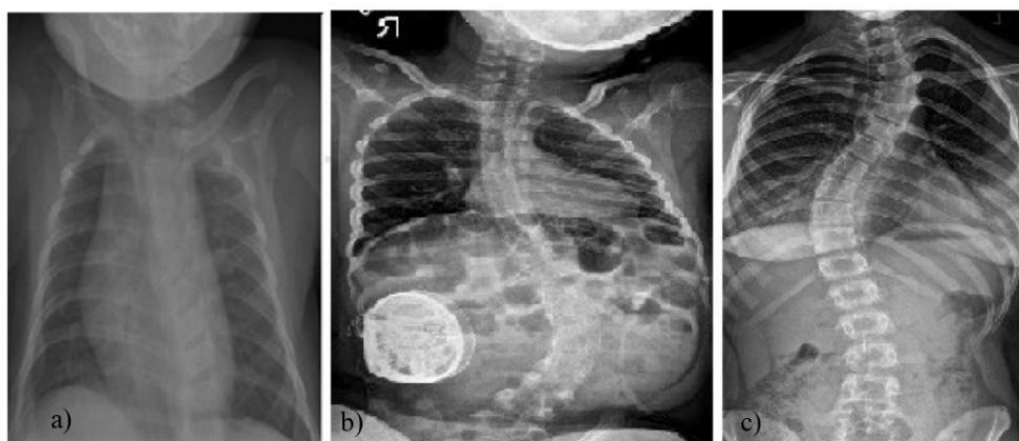
2.5	Metody regresji i miary oceny jakości modeli predykcyjnych	61
2.5.1	Miary statystyczne opisujące dane i modele regresji	61
2.5.2	Modele regresji stosowane w kalibracji pomiaru.....	65
3	Zastosowanie metod regresji dla zwiększenia dokładności pomiarów z ortometru	68
3.1	Badania na testowym stanowisku pomiaru kąta	68
3.1.1	Przebieg badań	70
3.2	Badania regresji na bazie pomiarów kąta wyznaczonego na podstawie akcelerometru.....	72
3.2.1	Badanie wstępne – regresja liniowa	72
3.2.2	Badania regresji wielomianowej	74
3.2.3	Badania regresji z wykorzystaniem modeli sieci neuronowych	82
3.3	Badania regresji na bazie pomiarów kąta wyznaczonego na podstawie akcelerometru i prędkości kątowej.....	89
3.3.1	Badania regresji wielomianowej z uwzględnieniem prędkości kątowej.....	89
3.3.2	Badania regresji z wykorzystaniem modeli RF, MLP i K-NNN	101
3.4	Wyniki estymacji modeli dla danych surowych z akcelerometru.....	105
3.5	Badania regresji dla danych uśrednionych z ACC.....	110
3.5.1	Wyznaczanie kąta - uśrednienie pomiarów.....	110
3.5.2	Wyznaczenie wielomianów odwrotnych dla danych uśrednionych	112
3.5.3	Wyznaczenie modelu wielomianu odwrotnego z uwzględnieniem prędkości kątowej dla uśrednionych danych pomiarowych	116
3.5.4	Wyznaczenie modeli RFP, MLP oraz KNN dla danych uśrednionych	116
3.5.5	Wyniki estymacji dla danych uśrednionych z ACC.....	117
3.6	Badania regresji dla danych z akcelerometru i żyroskopu	123
3.6.1	Wyznaczanie kąta na podstawie wskazań akcelerometru i żyroskopu	123
3.6.2	Modele KNNBase, MLP i RF	125
3.6.3	Wyniki estymacji dla danych z ACC i GYRO i modeli, powstałych na bazie ACC i GYRO	126
3.7	Badania regresji na bazie pomiarów na stanowisku obrotowym ortometru	132
3.7.1	Przebieg badań	133

3.7.2	Modele wielomianowe na bazie kąta oraz prędkości kątowej wyznaczonych przez ortometr	135
3.7.3	Modele RF, MLP i KNN.....	138
3.7.4	Wyniki estymacji.....	140
3.7.5	Wyniki estymacji – uśrednione pomiary prędkości kątowej	143
3.8	Badania na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji kręgosłupa	144
3.8.1	Przebieg badań	147
3.8.2	Wyniki eksperymentów – błędy pomiarowe oraz estymacja modeli.....	149
3.8.3	Badania pomiarów długości	157
3.8.4	Modele wielomianowe na bazie pomiaru drogi z ortometru oraz prędkości liniowej	158
3.8.5	Wyniki eksperymentów - estymacja pomiarów odległości.....	162
3.9	Podsumowanie i wnioski.....	163
3.9.1	Stanowisko obrotowe układu akcelerometru	163
3.9.2	Stanowisko obrotowe ortometru	168
3.9.3	Stanowisko pomiarowe długości i kątów rotacji.....	171
4	Metody przeznaczone do automatycznego wyznaczania asymetrii grzbietu oraz krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa	179
4.1	Metoda wyznaczania kąta rotacji tułowia ATR	180
4.2	Metoda wyznaczania punktów położenia poszczególnych kręgów na osi drogi kręgosłupa	182
4.3	Metoda automatycznego wyznaczania położenia punktów charakterystycznych	183
4.4	Metoda wyznaczenia sumy garbów HS	184
4.5	Krzywizny przednio-tylne kręgosłupa	186
4.6	Formularz ankiety	186
4.7	Kliniczne reguły decyzyjne kwalifikacji do grupy ryzyka wystąpienia skoliozy idiopatycznej	187
4.8	Drzewa decyzyjne	187
4.9	Studium przypadku badania pacjenta.....	191
4.10	Podsumowanie i wnioski.....	193
5	Metoda automatycznej analizy asymetrii grzbietu oraz krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa	195

5.1	Założenia projektowe	195
5.2	Wymagania normatywne.....	200
5.3	Elementy systemu	204
5.3.1	Ortometr	204
5.3.2	Architektura bazy danych.....	207
5.3.3	Aplikacja ORT	211
5.4	Scenariusze badań	215
5.4.1	Scenariusz postępowania podczas wykonywania testu Adamsa.....	216
5.4.2	Scenariusz postępowania podczas wykonywania pomiarów kątowych obręczy kończyn dolnych	220
5.4.3	Scenariusz postępowania podczas oceny krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa w płaszczyźnie strzałkowej	221
5.5	Badania wykonane w ośrodku rehabilitacji	224
5.6	Ilościowa analiza zebranych danych z ortometru	226
5.7	Wyniki badań na zbiorze osób badanych	228
5.7.1	Wyznaczenie zakresów pomiarowych dla ortometru.....	228
5.7.2	Zastosowanie metody wyznaczania położenia punktów charakterystycznych...	230
5.7.3	Wyznaczenie grup ryzyka IS z wykorzystaniem mechanizmów drzew decyzyjnych	233
5.8	Wdrożenie	234
5.9	Podsumowanie i wnioski.....	237
6	Kierunki dalszych badań	239
7	Podsumowanie	242
	Bibliografia.....	245
	Spis rysunków	262
	Spis tabel	270
	Spis załączników	278
	Spis publikacji i udział autora w projektach	279
	Załączniki	282

1 WSTĘP

Skoliozę definiuje się jako trójwymiarową deformację kręgosłupa, charakteryzującą się bocznym skrzywieniem większym niż 10 stopni, któremu towarzyszy rotacja kręgów w obrębie krzywizny. Skolioza może mieć różne podłoże i dzieli się na wrodzoną, nerwowo-mięśniową oraz idiopatyczną. Skolioza idiopatyczna (IS) jest najczęstszą postacią tej choroby i może być klasyfikowana według wieku wystąpienia na niemowlęcą (od urodzenia do dwóch lat), młodzieńczą (od trzech do dziewięciu lat) oraz wieku dojrzewania (od 10 lat) (Rys. 1). Jest to najczęstsza dziecięca choroba układu mięśniowo-szkieletowego, prowadząca do trójwymiarowej (3D) deformacji kręgosłupa [1]. Deformacja ta obejmuje nie tylko boczne przemieszczenie w płaszczyźnie czołowej, ale także osiową rotację kręgów oraz zmiany w krzywiznach fizjologicznych w płaszczyźnie strzałkowej. Skolioza idiopatyczna najczęściej rozwija się w okresach intensywnego wzrostu fizycznego, co sprawia, że skolioza w wieku dojrzewania stanowi jej najpowszechniejszą postać [2]. IS diagnozuje się, gdy nie można zidentyfikować innych czynników etiologicznych, takich jak wrodzone anomalie, choroby neurologiczne lub mięśniowo-szkieletowe, a także procesy zapalne czy demielinizacyjne prowadzące do uszkodzenia neuronów ruchowych, jak np. miotonia czy miopatia [3][4].



Rys. 1. (a) 4-miesięczny chłopiec urodzony jako mały w stosunku do wieku ciążowego, w 37 tygodniu, u którego początkowo stwierdzono asymetrię zarówno lewej, jak i prawej strony przedniej i tylnej klatki piersiowej oraz potwierdzoną skoliozę piersiowo-lędźwiową i anomalie kręgów na podstawie zwykłej radiografii z pomiarem kąta Cobba wynoszącym 30 stopni, (Sonal Desai, Radiopedia.org, rID: 63310 na licencji Creative Commons (CC BY 3.0)). [5]; (b) Zdjęcia rentgenowskie dziewczynki z młodzieńczą skoliozą idiopatyczną (Radiopaedia.org, rID: 89566 (CC BY 3.0)). [6]; oraz (c) ciężka skolioza młodzieńcza lewej strony klatki piersiowej, (Radiopaedia.org, rID: 89456 (CC BY 3.0)) [7].

Dotychczasowe protokoły oceny postawy ciała u dzieci koncentrowały się głównie na pomiarze asymetrii pleców przy pomocy skoliometru. Jednak, w odpowiedzi na rosnące potrzeby diagnostyczne, powstała potrzeba rozszerzenia panelu badania o dodatkowe parametry

oraz opracowania kompleksowego systemu, który umożliwiałby dokładniejszą ocenę stanu kręgosłupa i postawy ciała.

1.1 Cel i zakres pracy

Celem niniejszej pracy doktorskiej, mającej charakter wdrożeniowy, było opracowanie systemu do przesiewowych badań wad postawy dzieci i młodzieży przeznaczonego do wczesnego wykrywania skolioz, składającego się z aplikacji programowej ORT oraz rozwiązania sprzętowego ORT-100 (pełniącego funkcję ortometru), przeznaczonych do automatycznej analizy asymetrii grzbietu oraz krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa.

Opisane w pracy doktorskiej badania pozwoliły na:

- opracowanie metod automatycznej analizy asymetrii grzbietu oraz krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa do wczesnego wykrywania skolioz,
- zaimplementowanie opracowanych metod w systemie do przesiewowych badań wad postawy dzieci i młodzieży,
- przeprowadzenie serii badań weryfikujących działanie zaproponowanych rozwiązań.

Realizację pracy doktoratu wdrożeniowego rozpoczęto od przeglądu literatury w celu zapoznania się z budową kręgosłupa oraz metodami oceny asymetrii grzbietu i krzywizn przednio-tylnych. Szczególną uwagę poświęcono zagadnieniom związanym z diagnostyką skolioz oraz stosowanym w praktyce klinicznej technikom oceny postawy ciała. Przeanalizowano dostępne na rynku rozwiązania umożliwiające przesiewowe badania wad postawy u dzieci i młodzieży, co pozwoliło na identyfikację aktualnych trendów oraz stosowanych metod analizy obrazowej i biomechanicznej ze szczególnym uwzględnieniem istniejących rozwiązań informatycznych wspomagających diagnostykę.

Bazując na opublikowanych materiałach naukowych oraz badaniach realizowanych we współpracy Ośrodka Rehabilitacji Leczniczej „Troniny” z Instytutem Techniki i Aparatury Medycznej, obecnie Siecią Badawczą Łukasiewicz – Krakowskim Instytutem Technologicznym, w ramach projektu pt.: „Rozwój kompleksowego programu profilaktyki i leczenia wad postawy dzieci i młodzieży z wykorzystaniem innowacyjnych urządzeń do diagnostyki i leczenia wad postawy” realizując projekt RPO Województwa Śląskiego 2014-2020 (nr projektu RPSL.01.02.00-24-064B/16-00), wyznaczono charakterystyczne parametry asymetrii grzbietu oraz odchyłeń krzywizn kręgosłupa. Zebrane dane umożliwiły określenie kluczowych wskaźników diagnostycznych, wykorzystywanych do wczesnego wykrywania skolioz.

W ramach opracowania metod automatycznej analizy przygotowano algorytmy służące do przetwarzania danych pomiarowych z ortometru i danych ankietowych uzyskanych podczas badania postawy u dzieci i młodzieży. Opracowane algorytmy bazowały na metodach regresji wielomianowej i uczenia maszynowego do wyznaczania kąta wychylenia na bazie pomiarów przyspieszenia z akcelerometru oraz na wyznaczeniu drogi na bazie pomiarów z enkodera.

Dodatkowo opracowano metody automatycznego wyznaczenia parametrów wykorzystywanych w modelu badania postawy ciała. Uzyskane wartości parametrów zostały wykorzystane do oceny grup ryzyka i wad postawy na podstawie opracowanej metody realizującej kliniczne reguły decyzyjne zdefiniowane przez eksperta.

Na podstawie wyników badań i analiz opracowano system do przesiewowych badań wad postawy. Przygotowano dokumentację techniczną, obejmującą schematy działania algorytmów oraz opisującą interfejs użytkownika systemu pomiarowego. Opracowana aplikacja ORT została wdrożona do praktyki klinicznej i jest poddawana testom w warunkach rzeczywistych.

Opracowane rozwiązanie w postaci aplikacji ORT i ortometru ORT-100, umożliwiło przeprowadzenie szeregu badań, oceniających skuteczność detekcji skolioz oraz asymetrii grzbietu. Wyniki tych badań pozwoliły na udoskonalenie algorytmów oraz dostosowanie aplikacji do zastosowań klinicznych i przesiewowych badań populacyjnych.

1.2 Hipotezy pracy

Przeprowadzone badania pozwoliły autorowi na sformułowanie następujących hipotez pracy:

Hipoteza I: Zastosowanie metod regresji pozwala na zwiększenie dokładności pomiarów z ortometru.

W celu udowodnienia I hipotezy zrealizowane zostały następujące cele szczegółowe:

- Opracowanie stanowisk badawczych do pomiaru kąta rotacji tułowia i długości kręgosłupa:
 - stanowiska obrotowego układu akcelerometru i żyroskopu,
 - stanowiska obrotowego ortometru,
 - stanowiska pomiarowego długości i kątów rotacji z torem wzorcowym.
- Opracowanie metod kalibracji danych pomiarowych kąta z akcelerometru, żyroskopu oraz ortometru z wykorzystaniem wybranych algorytmów regresji: wielomianowej (w tym zależnej od prędkości kątowej) i uczenia maszynowego, w tym sieci neuronowych, najbliższych sąsiadów oraz lasu losowego.

- Weryfikacja metod poprzez estymację w zadanym zakresie pomiarowym wychylenia i prędkości kątowej.
- Weryfikacja skuteczności modeli wyznaczonych na danych uzyskanych na stanowiskach obrotowych z użyciem stanowiska pomiarowego długości i rotacji kąta w ruchu liniowym ortometru po torze wzorcowym.

Opracowanie powyższych metod pozwoliło na uzyskanie dokładniejszych wyników pomiarów z ortometru w zakresie kąta i drogi.

Wyniki prac i badań w tym zakresie zostały przedstawione w rozdziale 3.

Hipoteza II: Automatyczne wyznaczenie parametrów wykorzystywanych w modelu badania postawy ciała, pozwala na ocenę grupy ryzyka i wad postawy

W celu udowodnienia II hipotezy zrealizowane zostały następujące cele szczegółowe:

- Metoda wyznaczenia kąta rotacji tułowia oraz sumy maksimów garbów piersiowego i lędźwiowego do oceny asymetrii grzbietu.
- Metoda wyznaczenia punktów położenia poszczególnych kręgów na osi drogi kręgosłupa.
- Implementacja ankiet wypełnianych przez personel medyczny oraz automatycznej prezentacji wyników.
- Opracowanie metod do wyznaczenia grupy ryzyka i rodzaju wad postawy na bazie eksperckiego drzewa decyzyjnego.

Opracowanie powyższych metod pozwoliło na wyznaczanie asymetrii grzbietu oraz krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa, bazując na wynikach pomiarów z ortometru oraz badań ankietowych wypełnianych przez personel medyczny.

Wyniki prac i badań w tym zakresie zostały przedstawione w rozdziale 4.

Hipoteza III: Metoda automatycznej analizy asymetrii grzbietu oraz krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa stanowi użyteczne narzędzie do wczesnego wykrywania skolioz u dzieci i młodzieży.

W celu udowodnienia III hipotezy zrealizowane zostały następujące cele szczegółowe:

- Opracowanie założeń projektowych i wymagań normatywnych dla systemu ORT.

- Opracowanie ortometru elektronicznego ORT-100 oraz architektury aplikacji użytkowej ORT.
- Opracowanie systemu bazodanowego ORT do przechowywania danych diagnostycznych, pomiarowych oraz scenariuszy badań.
- Implementacja scenariuszy badań medycznych.
- Przeprowadzenie badań wykrywania skolioz u dzieci i młodzieży przez specjalistę z dziedziny medycyny z wykorzystaniem aplikacji ORT i ortometru elektronicznego ORT-100, w ośrodku rehabilitacji.
- Przeprowadzenie analizy ilościowej zebranych danych pomiarowych.
- Przeprowadzenie oceny skuteczności metody automatycznego wyznaczania punktów charakterystycznych do analizy asymetrii grzbietu oraz krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa.
- Wyznaczenie grup ryzyka wystąpienia skoliozy idiopatycznej.

Zrealizowane cele szczegółowe pozwoliły na wdrożenie **narzędzia do wczesnego wykrywania skolioz u dzieci i młodzieży**

Wyniki prac i badań w tym zakresie zostały przedstawione w rozdziale 5.

2 ANALIZA ZAGADNIENIA

Rozdział zawiera opis metod i technologii do diagnozy skoliozy używanych współcześnie oraz w przeszłości. Następnie opisano w nim na czym polegają badania przesiewowe dzieci i młodzieży we wczesnej detekcji skoliozy. Szczegółowo opisano ideę pomiaru kąta rotacji tułowia z wykorzystaniem skoliometru i jego elektronicznych wersji. Przedstawiono w nim także model badania postawy ciała z wykorzystaniem ortometru. Na końcu rozdziału umieszczono część teoretyczną z definicjami miar statystycznych i modeli regresji wykorzystywanych w niniejszej pracy.

2.1 Przegląd metod i technologii używanych do diagnozy skoliozy

Niniejsza część pracy przedstawia zarówno metody diagnostyczne, jak i informatyczne wykorzystywane w rozpoznawaniu skoliozy w formie krótkiego przeglądu. Przegląd ma na celu wskazanie zalet wybranych metod. Opracowanie koncentruje się na zagadnieniach ogólnych, bez szczegółowego omawiania kwestii ściśle związanych z fizjoterapią i metodami leczenia.

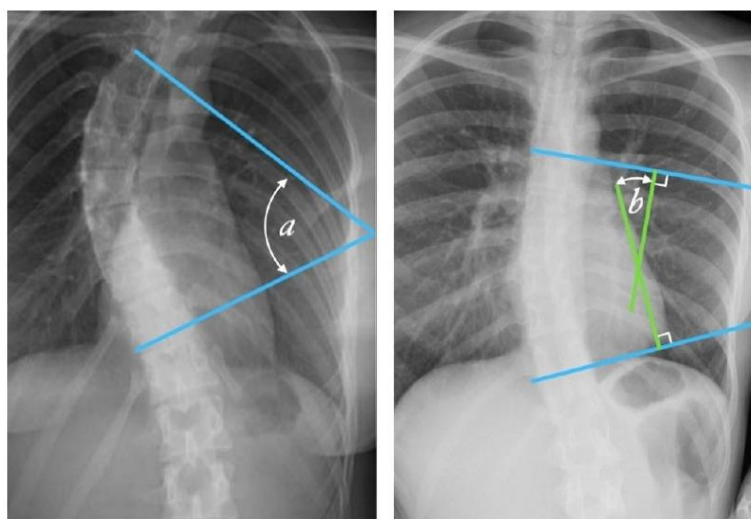
2.1.1 Tradycyjne metody pomiaru stopnia skrzywienia kręgosłupa

W przeszłości skolioza była badana za pomocą różnych metod, takich jak inklinometry, które służyły do pomiaru kąta pochylenia tułowia, pantografy, umożliwiające odwzorowanie kształtu pleców na płaszczyźnie, a także gipsowe odlewy pleców, które pozwalały na trójwymiarową ocenę deformacji [8]. Te metody, choć miały swoje zastosowanie, były ograniczone w zakresie dokładności oraz możliwości długoterminowego monitorowania postępu skrzywienia. Proces powstawania skoliozy wiąże się z skrętnymi zmianami wzrostowymi, które zachodzą zarówno w obrębie kręgosłupa, jak i całego tułowia. Są one wynikiem działania sił mechanicznych, takich jak obciążenia grawitacyjne oraz napięcie mięśni i więzadeł, które prowadzą do stopniowego modelowania struktury kręgosłupa [9][10]. W efekcie dochodzi do rotacji kręgów, co odróżnia skoliozę od innych rodzajów deformacji kręgosłupa.

Obecnie radiografia kręgosłupa stanowi podstawową metodę diagnostyczną, wykorzystywaną do monitorowania i oceny stopnia zaawansowania skoliozy. Jest uznawana za złoty standard w diagnostyce deformacji kręgosłupa, ponieważ pozwala na dokładne określenie kąta skrzywienia, jego lokalizacji oraz ewentualnej progresji w czasie. Jednak długotrwała ekspozycja na promieniowanie rentgenowskie, zwłaszcza u dzieci i młodzieży, budzi obawy dotyczące potencjalnych skutków zdrowotnych, takich jak zwiększone ryzyko nowotworów.

Jedną z pierwszych metod oceny skrzywienia kręgosłupa na zdjęciach rentgenowskich zaproponował w 1930 roku Ferguson, który określał stopień deformacji poprzez wyznaczenie kąta pomiędzy dwiema prostymi łączącymi środki końcowych kręgów ze środkiem kręgu wierzchołkowego [11]. Była to jedna z pierwszych prób ilościowej analizy skoliozy, jednak metoda ta została później zastąpiona dokładniejszymi technikami.

Najbardziej rozpowszechnioną metodą oceny skoliozy jest pomiar kąta Cobba, opracowany w 1948 roku przez Johna Roberta Cobba. Technika ta polega na zidentyfikowaniu najbardziej pochylonych kręgów znajdujących się powyżej i poniżej wierzchołka skrzywienia, narysowaniu linii wzdłuż górnej krawędzi górnego kręgu i dolnej krawędzi dolnego kręgu oraz na zmierzaniu kąta utworzonego przez linie prostopadłe do tych krawędzi [12]. Pomiar kąta Cobba stał się standardową metodą ilościowej oceny skoliozy, stosowaną zarówno w diagnostyce, jak i w monitorowaniu postępu skrzywienia oraz ocenie skuteczności leczenia [13] (Rys. 2).



Rys. 2. Pomiar kąta Cobba. Linie styczne są rysowane od górnej płyty końcowej górnego kręgu i dolnej płyty końcowej dolnego kręgu. Kąt utworzony na przecięciu tych dwóch linii to kąt Cobba. Kąt Cobba wynoszący co najmniej 10 stopni jest niezbędny do zdiagnozowania skoliozy. (Radiopaedia.org, rID: 49374, (CC BY 3.0)). [14] Kąt Cobba jest definiowany jako kąt pomiędzy liniami stycznymi (kąt a) lub kąt pomiędzy dwiema liniami prostopadłymi (linie ciągłe) do stycznych (kąt b).

Radiolodzy mierzą kąt Cobba ręcznie, używając kątomierza po wcześniejszym wyznaczeniu kręgów granicznych. Pomiar ten polega na [14][15]:

- Narysowaniu linii stycznej do górnej płyty końcowej górnego kręgu granicznego oraz dolnej płyty końcowej dolnego kręgu granicznego.
- Poprowadzeniu linii prostopadłych do obu tych linii na najbardziej nachylonym kręgu.

Kąt Cobba jest szeroko stosowany w diagnostyce skoliozy, ponieważ pozwala na ocenę stopnia początkowego skrzywienia, monitorowanie jego progresji oraz określenie najkorzystniejszego momentu do ewentualnej interwencji chirurgicznej. Jednak dokładność tego pomiaru zależy głównie od doświadczenia radiologa, co wprowadza element subiektywności do oceny [13]. Metoda Cobba była stosowana przez wielu klinicystów, którzy zwracali uwagę na możliwe błędy pomiarowe. Badania wykazały, że błąd pomiaru kąta Cobba może wynosić nawet $11,8^\circ$ [16]. Wcześniej używano urządzenia zwanego Cobbometrem, jednak jego niedokładność wpływała na diagnozę i planowanie leczenia pacjentów ze skoliozą. W celu poprawy precyzji diagnostycznej opracowano nowoczesne metody pomiaru kąta Cobba, które pozwalają na lepszą ocenę pełnej trójwymiarowej deformacji kręgosłupa. Dzięki nowoczesnym technikom obrazowania możliwe stały się rekonstrukcje 3D, które oferują większą dokładność w porównaniu do tradycyjnych pomiarów rentgenowskich [17].

Metody Cobba i Fergusona opierają się na ręcznej identyfikacji kręgów granicznych, jednak ze względu na lepszą powtarzalność wyników, łatwiejszą aplikację w praktyce klinicznej, możliwość dokładniejszego pomiaru skrzywień o większym kącie, preferowaną metodą jest pomiar Cobba. Metoda ta została ustandaryzowana, a jej powtarzalność i wiarygodność potwierdzono w licznych badaniach naukowych [18]-[26].

Jedną z prostszych procedur diagnostycznych jest test Adamsa, opisany przez Williama Adamsa w 1865 roku, który pozwala na ocenę postawy oraz wstępne rozpoznanie skoliozy. Test Adamsa zaliczany jest do tzw. testów funkcjonalnych. Jest to krótka, nieinwazyjna i bezbolesna procedura, która nie wymaga użycia żadnych specjalistycznych przyrządów, co sprawia, że jest powszechnie stosowana przez fizjoterapeutów i ortopedów. Podczas badania pacjent pochyla się do przodu, a lekarz stoi za nim, oceniając krzywiznę kręgosłupa oraz obserwując kąt rotacji tułowia wzdłuż poziomej płaszczyzny. Bunnell zaproponował proste ręczne urządzenie – skoliometr, które jest często używane do pomiaru i oceny kąta rotacji tułowia w trakcie testu Adamsa, szczególnie w celach przesiewowych [27]. W ostatnich latach lekarze zaczęli zauważać, że wykrywanie skoliozy za pomocą testów Adamsa może być niewystarczające. Negatywny wynik tego testu często prowadzi do odrzucenia diagnozy skoliozy, ponieważ test ten jest skuteczny głównie w wykrywaniu skoliozy w zaawansowanym stadium [28].

Uznaje się, że deformacja powierzchni nie jest wystarczająca do dokładnego przewidywania stopnia zaawansowania skoliozy, szczególnie u młodszych dzieci. Bunnell stwierdził, że choć korelacja między deformacją kliniczną a pomiarem radiograficznym jest

znacząca, to jednak odchylenie standardowe jest na tyle duże, że wiarygodne przewidywanie stopnia skrzywienia na podstawie topografii powierzchni pacjenta nie jest możliwe przy użyciu żadnej z dostępnych technik [29]. Mimo to, w 2021 roku, tradycyjne badania przesiewowe w kierunku skoliozy są wciąż wykonywane przy użyciu testu Adamsa, a pomiar kąta Cobba pozostaje uznawany za złoty standard. Ręczny wybór kręgów przez klinicystów prowadzi jednak do niedokładności pomiaru. Na wynik mają wpływ zarówno wybór kręgów, jak i stronniczość różnych obserwatorów. Niemniej jednak, w połączeniu z nowoczesnymi technikami diagnostyki obrazowej, metody te mogą pomóc uniknąć lub zminimalizować błędy, które były powszechne w przeszłości.

Współczesna medycyna jest silnie związana z informatyką medyczną. Niemal każda dziedzina opieki zdrowotnej została połączona z różnymi technikami informatycznymi, co przynosi doskonałe rezultaty w ocenie wielu schorzeń. Aplikacje komputerowe i odpowiednie oprogramowanie stały się nieocenionymi narzędziami w rękach lekarzy, którzy potrafią skutecznie je wykorzystać. W rezultacie medycyna staje się coraz bardziej interdyscyplinarna. Powstaje wiele aplikacji, które odpowiadają na potrzeby społeczności medycznej i różnych specjalistów.

2.1.2 Obrazowanie topografii powierzchni i ocena deformacji kręgosłupa

Topografia powierzchni ciała (ST) jest techniką fotogrametryczną, która zajmuje się rekonstrukcją kształtów, rozmiarów i wzajemnych pozycji obiektów na podstawie obrazów fotogrametrycznych (fotogramów). ST obejmuje obrazowanie oraz analizę zewnętrznych konturów tułowia, zwykle od strony pleców pacjenta. Metoda ta jest z powodzeniem wykorzystywana do oceny deformacji tułowia u dzieci ze skoliozą, opierając się na zależności pomiędzy kątem skrzywienia kręgosłupa a deformacją powierzchni ciała. Do niewątpliwych zalet ST należą: nieinwazyjność, bezpieczeństwo badania, szybka i dokładna ocena postawy ciała w trzech płaszczyznach przestrzennych, komputerowe przechowywanie danych oraz wysoka akceptacja tej metody przez dzieci i młodzież w wieku szkolnym.

Wraz z postępem technologicznym, rozwój metod obrazowania i analizy postawy ciała oraz deformacji kręgosłupa nabiera coraz większego znaczenia. Metody takie jak topografia powierzchni ciała (ST) stanowią nowoczesne podejście, pozwalające na dokładną ocenę deformacji tułowia, szczególnie w kontekście skoliozy, bez konieczności stosowania inwazyjnych procedur. W następstwie tych osiągnięć, pojawiły się kolejne techniki, takie jak metoda Mory czy topografia rastrowa z automatyczną analizą obrazu, które jeszcze bardziej ulepszają diagnostykę skoliozy i innych problemów posturalnych, oferując szybkie, bezkontaktowe oraz bezpieczne

metody pomiarowe. Kolejnym krokiem w tym rozwoju jest wykorzystanie metod optoelektronicznych, takich jak na przykład system „Diers Formetric II 4D”, które zapewniają jeszcze wyższy poziom precyzji i automatyzacji w badaniu postawy ciała.

2.1.3 Metoda MORY

Technika wzorca Mory, znana także jako technika projekcyjna Mory, jest metodą fotogrametrii przestrzennej (fototopografii), która zajmuje się rekonstrukcją kształtów i pozycji oraz pomiarem obiektów przestrzennych na podstawie tzw. fotogramów, czyli specjalnych obrazów fotograficznych. Paski Mory to układ pasów powstający w wyniku interferencji (nakładania się) dwóch siatek linii obróconych pod określonym kątem lub zniekształconych względem siebie. Rozwój metody Mory przebiegał w dwóch kierunkach: tradycyjny obraz rastrowy został zastąpiony obrazem optycznym, który jest diapozytywem pasów projekcyjnych wyświetlanych na powierzchni badanego obiektu przy użyciu projektora slajdów. Drugi kierunek wiąże się z rozwojem nowoczesnych technik komputerowych.

Ogólna zasada uzyskiwania informacji o kształcie powierzchni przy użyciu techniki Mory opiera się na analizie obrazu siatki liniowej (rastra), która jest optycznie przesunięta na badaną powierzchnię [30]. Pacjent ze skoliozą charakteryzuje się specyficzną różnicą między liniami konturowymi obu połówek ciała. Obecnie celem jest uproszczenie i automatyzacja metod pomiarowych, dlatego wykorzystuje się optyczny raster (diapozytyw pasów rzutowanych na ciało badanego) oraz komputerową analizę uzyskanego obrazu [31].

2.1.3.1 Topografia rastrowa z automatyczną analizą obrazu

Rozwój technik komputerowych przyczynił się do rozwoju metody topografii rastrowej z automatyczną analizą obrazu, znanej również jako stereografia rastrowa [32]. Tradycyjny raster, wykorzystywany w klasycznych metodach pomiarowych, został zastąpiony optycznym, którym jest diapozytyw pasów rzutowanych na badaną powierzchnię za pomocą projektora slajdów. W wyniku interferencji i nakładania się tych pasów tworzy się charakterystyczny wzór, który jest następnie rejestrowany przez specjalny system optyczny z kamerą. Obraz zarejestrowany przez kamerę przesyłany jest do komputera, który dokonuje analizy i rekonstrukcji trójwymiarowej powierzchni.

Dzięki zastosowaniu tej technologii możliwe jest uzyskanie bardzo precyzyjnych pomiarów, które mogą być wykorzystane w diagnostyce skoliozy oraz innych deformacji postawy ciała. Automatyczna analiza obrazu zapewnia szybki, powtarzalny i obiektywny pomiar,

eliminując wpływ subiektywnego czynnika ludzkiego. Ponadto, proces analizy odbywa się bez konieczności stosowania jakichkolwiek znaczników fizycznych na ciele pacjenta, co czyni go bezkontaktowym i bezpiecznym. Wykorzystanie topografii rastrowej w medycynie pozwala na uzyskanie dokładnych danych dotyczących kształtu ciała pacjenta oraz identyfikację potencjalnych problemów, takich jak skrzywienia kręgosłupa, asymetrie w postawie czy wady postawy. Metoda ta może być stosowana zarówno w diagnostyce, jak i w monitorowaniu postępu terapii, a jej bezinwazyjność sprawia, że jest to doskonała alternatywa dla tradycyjnych, często bolesnych i czasochłonnych badań obrazowych, takich jak zdjęcia rentgenowskie. Ponadto, dzięki integracji z nowoczesnymi systemami komputerowymi, możliwe jest gromadzenie danych w długoterminowej bazie, co umożliwia monitorowanie zmian w czasie oraz lepsze dopasowanie metod leczenia i rehabilitacji do indywidualnych potrzeb pacjenta.

2.1.3.2 Metoda optoelektroniczna „Diers Formetric II 4D”

Metoda optoelektroniczna „Diers Formetric II 4D” jest bezpieczna dla pacjenta, ponieważ nie wykorzystuje promieniowania jonizującego. Zapewnia szybki, bezkontaktowy oraz automatyczny pomiar i analizę kręgosłupa za pomocą technologii światłowodowej (instrument wykrywa określone punkty anatomiczne bez potrzeby używania znaczników). Urządzenie umożliwia precyzyjne obliczenie linii środkowej kręgosłupa oraz krzywej rotacji, eliminując najczęstszy błąd pomiarowy, zwany czynnikiem ludzkim. Jest to doskonała alternatywa dla badań inwazyjnych, zwłaszcza ze względu na swoją dostępność, ponieważ idealnie nadaje się do oceny efektów terapii przed i bezpośrednio po jej zakończeniu [33][34][35]. Badanie charakteryzuje się wysoką dokładnością, a dzięki bezpośredniemu widokowi na badaną powierzchnię lekarz może analizować ją w czasie rzeczywistym. Urządzenie do badania trójwymiarowego składa się z dwóch głównych elementów: cyfrowej kamery wideo oraz projektora. Sprzęt emituje wiązki pomiarowe, które są kierowane na kręgosłup pacjenta. Zebrane w ten sposób dane są natychmiast przesyłane do komputera, a specjalny program tworzy mapę cyfrową wskazanej części ciała. Uzyskane pomiary mogą być wykorzystane na późniejszym etapie do diagnozy problemu oraz wyznaczenia dalszego postępowania w przypadku dolegliwości. Trójwymiarowa analiza kręgosłupa może być również stosowana u kobiet w ciąży.

2.1.4 Metody obrazowania i oceny skoliozy przy użyciu radiografii

Radiografia, powszechnie znana jako zdjęcie rentgenowskie, odgrywa kluczową rolę w obrazowaniu kręgosłupa [36]. Dostarcza podstawowego obrazu, obejmującego dwie główne projekcje: przednio-tylną (AP)/tylno-przednią (PA) oraz boczną (LAT). W przeszłości zdjęcia rentgenowskie kręgosłupa były wykonywane bardzo powszechnie, jednak z biegiem czasu podjęto wysiłki mające na celu ograniczenie ekspozycji pacjentów na promieniowanie rentgenowskie. W latach 1935-1965 zachorowalność na raka piersi niemal podwoiła się [37]. Dziś dawki promieniowania są znacznie niższe, ale liczba zdjęć rentgenowskich, które muszą być wykonane dzieciom w okresie dojrzewania w związku z diagnozowaniem lub podczas diagnozy, wynosi co najmniej 12. Niestety, ryzyko zachorowania na raka w wyniku skumulowanej dawki promieniowania rentgenowskiego jest wielokrotnie wyższe u dzieci niż u dorosłych [38][39][40].

Rozwój technologii i komputeryzacji umożliwił wykorzystanie metod optoelektronicznych do lokalizacji problemów związanych z postawą i statyką ciała. Niemniej jednak, niezastąpioną przewagą zdjęć rentgenowskich wciąż pozostaje możliwość precyzyjnego obliczenia kąta skrętu za pomocą metody Cobba oraz monitorowania zmian morfologicznych w obrębie kręgów. Jak już wspomniano, zdjęcie rentgenowskie wiąże się z ekspozycją na promieniowanie, co sprawia, że diagnoza może być rozciągnięta w czasie. Personel medyczny nie zawsze jest w stanie dokładnie określić, czy zastosowany proces leczenia przebiega prawidłowo, czy przynosi pożądane efekty. Dlatego idealnym narzędziem diagnostycznym są metody diagnostyki komputerowej: są one precyzyjne, nieinwazyjne i nie wiążą się z szkodliwym promieniowaniem rentgenowskim. Komputerowe metody analizy postawy mają duże znaczenie praktyczne, ponieważ pozwalają wychwycić pierwsze oznaki skrzywienia. Dodatkowo umożliwiają obserwację ciała pacjenta w różnych płaszczyznach oraz lokalizację problemów, które mogą jeszcze nie być widoczne gołym okiem. Do metod komputerowych wykorzystywanych w badaniach postawy należą m.in. metoda pasków Mory, metoda ISIS, Posturomet-S, system Metrecom oraz metoda Diers formetric III 4D optoelektroniczna [33][34][41][42][43][44][45][46].

2.1.5 Metoda obrazowania i oceny skoliozy przy użyciu rezonansu magnetycznego (MRI)

Rezonans magnetyczny (MRI) to nieinwazyjna metoda, która zyskuje coraz szersze zastosowanie, zwłaszcza w rozwoju specjalistycznych metod i sekwencji. Badanie wykorzystuje atom wodoru, który umożliwia proces rezonansu magnetycznego, dzięki posiadaniu spinu i momentu magnetycznego. Początkowo momenty magnetyczne są chaotyczne, ale po zastosowaniu silnego zewnętrznego pola magnetycznego (B_0) momenty te stają się

uporządkowane — wektory równoległe lub antyrównoległe do głównego pola magnetycznego. Atomy z nieparzystą liczbą protonów i/lub neutronów są zobrazowane jako wirujące, naładowane cząstki o małym momencie magnetycznym. Skaner MR posiada trzy pola magnetyczne, które oddziałują z tymi wirującymi cząstkami, zwanymi spinami: główne pole magnetyczne (B_0), pole częstotliwości radiowej (RF) (B_1) oraz pole gradientowe (G). Pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego B_0 część spinów ustawia się w jego kierunku, co powoduje, że mają one niezerowy moment magnetyczny.

Po wzbudzeniu impulsem RF (B_1) wektor magnetyzacji jest przechylany do płaszczyzny poprzecznej, gdzie obraca się wokół zewnętrznego pola z częstotliwością Larmora, co prowadzi do powstania sygnału MR. Druga akcja impulsu RF powoduje, że spiny stają się uporządkowane w kierunku lub stają się spójne fazowo w płaszczyźnie poprzecznej. Z czasem układ powraca do równowagi, a spiny wracają do swoich pierwotnych orientacji, tracąc spójność fazową. W wyniku tego układ formuje się ponownie wzdłuż osi z, równoległe do zastosowanego głównego pola magnetycznego, osiągając wartość M_0 . Ten powrót do równowagi charakteryzuje się dwoma ortogonalnymi procesami: relaksacją wzdłużną (T_1) i poprzeczną (T_2), zależnymi od czasów relaksacji T_1 i T_2 . Relaksacja T_1 opisuje proces odzyskiwania równowagi w kierunku podłużnym (z), gdzie T_1 to czas odpowiadający odzyskaniu 63% wartości równowagi, natomiast T_2 charakteryzuje utratę spójności fazowej w płaszczyźnie poprzecznej, gdzie T_2 odpowiada utracie 63% początkowej wartości. Sygnał jest wykrywany przez specjalnie zaprojektowane cewki RF i przesyłany do komputera w celu rekonstrukcji obrazu. Czas, w którym wzbudzone atomy tkanek badanego obiektu powracają do równowagi, jest przedstawiany na obrazie w postaci różnych odcieni szarości [47]. To zjawisko jest możliwe, ponieważ wodór jest częścią cząsteczki wody, która stanowi 60-70% ludzkiego ciała, a także występuje w tłuszczu. Rozmieszczenie wodoru w różnych częściach ciała jest parametrem, który różnicuje struktury. Zarówno czasy relaksacji, jak i gęstość protonów mają wpływ na jasność obrazu, czyli stopień szarości uzyskany na obrazie. Badanie wiąże się z zastosowaniem silnego pola magnetycznego, dlatego nie jest zalecane dla pacjentów z metalowymi implantami. Ryzyko zdrowotne wynikające z badania jest minimalne, zazwyczaj związane z reakcjami alergicznymi po podaniu środka kontrastowego.

Drugi etap badania polega na wykryciu sygnału MR i jego rekonstrukcji w celu utworzenia obrazu, nazywanego „akwizycją”. Przestrzenne kodowanie sygnału MR wymaga lokalizacji w trzech wymiarach. W jednowarstwowym obrazowaniu kartezyjskim 2D najpierw pobudza się spiny jądrowe w cienkiej warstwie, następnie stosuje się impuls gradientu kodowania fazy, aby nałożyć określoną zależność fazową w obrębie warstwy, a na końcu odczytuje się sygnał. W kierunku prostym do warstwy odtwarzany jest liniowy gradient pola magnetycznego

(kodowanie częstotliwości). Ta sekwencja impulsów RF i gradientowych jest powtarzana dla każdego gradientu kodowania fazy, a na końcu stosuje się transformację Fouriera 2D uzyskanego sygnału, aby zrekonstruować obraz [48].

Współczesne metody diagnostyczne są szeroko stosowane w wielu dziedzinach specjalistycznych, co pokazuje, jak fizyka, informatyka i medycyna zostały połączone. MRI może być wykonywane na praktycznie każdej części ciała przy użyciu odpowiednio dobranej sekwencji. MRI znajduje zastosowanie w diagnostyce pacjentów ze skoliozą, szczególnie do oceny struktur nerwowych i kształtu kanału kręgowego. Należy jednak pamiętać, że to badanie nie powinno być powtarzane częściej niż raz. Rutynowe przedoperacyjne stosowanie MRI budzi kontrowersje, a wskazania do stosowania MRI w skoliozie idiopatycznej różnią się w zależności od przypadku (np. wczesna skolioza) [49][50]. MRI jest również wykorzystywane w diagnostyce wrodzonych wad kostnych kręgosłupa, takich jak zespół Klippel-Feila, niedorozwój kręgów, półkręgi, zrosty międzyżuchwowe, zrosty wyrostków stawowych, zrosty żeber i bloki kostne. Obserwowane są również wady nerwowo-kostne, jak przepuklina oponowa (mielocela, mielomeningocela) [51]. MRI stosuje się także w diagnostyce układu nerwowego, w takich przypadkach jak choroba Recklinghausena, guzy kręgosłupa, syringomielia, zespół Arnolda-Chiari, a także w skoliozie o nietypowym wzorze (np. skolioza lewostronna piersiowa), diagnostyce wrodzonego skrzywienia kręgosłupa oraz w przypadku współistniejących zaburzeń neurologicznych w celu wykrycia wad układu nerwowego. Skolioza może powodować szereg dysfunkcji u pacjentów, a jej rozwój wiąże się z takimi chorobami jak syringomielia, anomalia segmentacji kręgosłupa, guz rdzenia kręgowego czy wada Chiari [52][53][54][55].

Medycyna XXI wieku staje się coraz bardziej spersonalizowana, co widać m.in. przez rozwój dedykowanych implantów. Dedykowany implant to rozwiązanie, które coraz częściej stosuje się w chirurgii kręgosłupa, zwłaszcza gdy konieczne jest odtworzenie prawidłowej krzywizny kręgosłupa, która została utracona na skutek choroby degeneracyjnej, wrodzonego defektu lub zaburzeń osi kręgosłupa. Taki kręgosłup nie jest w stanie utrzymać prawidłowej linii, przechyla się na bok, obraca lub przesuwa do przodu. Materiały, z których wykonane są implanty, to m.in. polietereeteroketon (PEEK), tytan, kobalt-chrom lub materiały bioresorbowalne. PEEK jest przezroczysty dla promieni rentgenowskich, dlatego implanty te zawierają małe markery rentgenowskie. Z kolei implanty tytanowe są widoczne na zdjęciach rentgenowskich i bezpieczne w badaniach MRI [59][60][61].

2.1.6 Tomografia komputerowa (TK)

Chociaż obrazy 2D są nadal szeroko stosowane w badaniach klinicznych, postępy w medycynie doprowadziły do opracowania nowej techniki 3D, która stała się ważnym współczesnym narzędziem, uzyskiwanym za pomocą tomografii komputerowej (TK) oraz obrazowania rezonansem magnetycznym (MRI) [62][63]. Te metody rozwijają się w bardzo szybkim tempie i są w pełni zautomatyzowane lub półautomatyzowane (wymagają minimalnej interwencji). Tomografia komputerowa zyskała szybko uznanie ze względu na trudności związane z oceną obrazów rentgenowskich, które zazwyczaj wykonywano w dwóch projekcjach. Jednak nie dawało to pełnego obrazu problemu, a ocena krzywizn nie była łatwa. Tomografia komputerowa jest z powodzeniem stosowana do wykonywania przekrojowych obrazów badanych części ciała od 1973 roku (wprowadzenie tomografów do szpitali).

W XX i XXI wieku zastrzeżone zostały procedury związane z wykorzystaniem promieniowania rentgenowskiego, wprowadzając jeszcze więcej ograniczeń związanych z zastosowaniem ochrony radiologicznej dla pacjenta. Aby ograniczyć ekspozycję na promieniowanie, przekroje są zazwyczaj wykonywane na poziomie kręgosłupa, kręgosłupa i miednicy [64]. Wraz z rosnącą liczbą obrazów medycznych pojawiło się coraz więcej metod, które są w pełni zautomatyzowane lub półautomatyzowane, czyli wymagają minimalnej interwencji manualnej, jednak dotyczą one głównie cyfrowej radiografii rentgenowskiej. W przeciwieństwie do tego, w badaniach TK, lekarz musi ustawić odpowiednie parametry, aby lepiej sprawdzić chorobę lub stopień skoliozy. Parametry te powinny być optymalizowane i wymagają bardzo dobrej wiedzy na temat wpływu parametrów na wyniki. Dlatego konieczne jest stosowanie specjalnie opracowanych metod do ilościowej oceny krzywizn kręgosłupa, które mogą poprawić diagnozę medyczną, leczenie i zarządzanie zaburzeniami kręgosłupa, a także wspierać pracę lekarzy.

2.1.7 Sztuczna inteligencja jako metoda wykrywania skoliozy

Teorie sztucznej inteligencji: sieci neuronowe naśladują działanie ludzkiego mózgu, umożliwiając programom komputerowym rozpoznawanie wzorców i rozwiązywanie typowych problemów w dziedzinach sztucznej inteligencji, uczenia maszynowego oraz głębokiego uczenia. Sieci neuronowe, znane również jako sztuczne sieci neuronowe (ANN) lub symulowane sieci neuronowe (SNN), są integralną częścią uczenia maszynowego i stanowią podstawę algorytmów głębokiego uczenia.

Sztuczne sieci neuronowe (ANN) składają się z warstw węzłów, w tym warstwy wejściowej, jednej lub więcej warstw ukrytych oraz warstwy wyjściowej. Każdy węzeł (sztuczny

neuron) łączy się z innymi, posiada przypisaną wagę oraz próg. Jeśli wynik pojedynczego węzła przekroczy określony próg, węzeł zostaje aktywowany, przekazując dane do kolejnej warstwy sieci. W przeciwnym razie dane nie są przekazywane.

Każdy indywidualny węzeł można traktować jako model regresji liniowej, składający się z wejść, wag, progów (wariacji) i wyjść. Wzór jest następujący:

$$\sum_{i=1}^m w_i x_i + bias = w_1 x_1 + w_2 x_2 + w_3 x_3 + bias \quad (1)$$

$$wyjście = f(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } \sum w_i x_i + b \geq 0 \\ 0 & \text{if } \sum w_i x_i + b < 0 \end{cases} \quad (2)$$

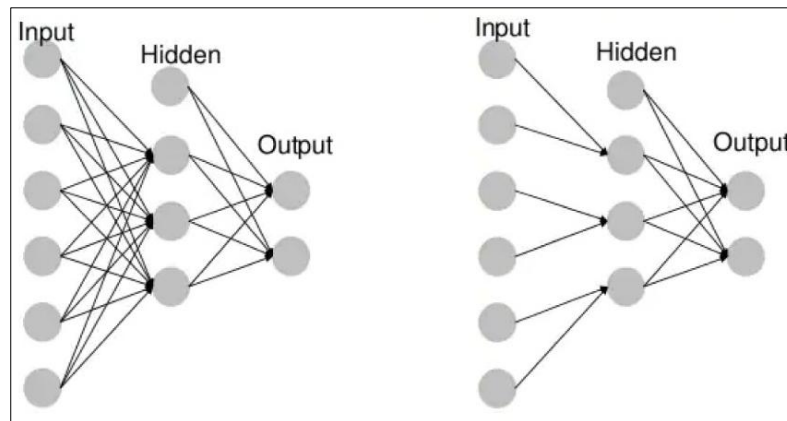
Ogólny wzór opisujący działanie neuronu:

$$y = f(s) \quad (3)$$

gdzie,

$$S = \sum_{i=0}^n x_i w_i \quad (4)$$

Funkcja aktywacji może przyjmować różne formy w zależności od konkretnego modelu neuronu. Po określeniu warstwy wejściowej następuje przypisanie wag. Sieci neuronowe można klasyfikować na różne typy i wykorzystywać do różnych celów. Najstarszą z sieci neuronowych jest perceptron, stworzony przez Franka Rosenblatta w 1958 roku. Składa się z jednego neuronu i stanowi najprostszą formę tego typu sieci. Jednokierunkowe sieci neuronowe, czyli wielowarstwowe perceptrony (MLP) (Rys. 3), składają się z warstwy wejściowej, jednej lub więcej warstw ukrytych oraz warstwy wyjściowej. Chociaż te sieci często określa się mianem MLP, warto pamiętać, że w rzeczywistości są to neurony sigmoidalne, a nie perceptrony, ponieważ większość problemów w rzeczywistych zastosowaniach ma charakter nieliniowy. Modele te są trenowane na podstawie danych i stanowią podstawę dla widzenia komputerowego, przetwarzania języka naturalnego oraz innych typów sieci neuronowych [103]. Natomiast, splotowe sieci neuronowe (CNN) są podobne do sieci jednokierunkowych, ale zazwyczaj stosuje się je do rozpoznawania obrazów, wzorców oraz analizy wizji komputerowej. Wykorzystują zasady algebry liniowej, w szczególności mnożenie macierzy, do identyfikacji wzorców w obrazach. Z kolei, rekurencyjne sieci neuronowe (RNN) wyróżniają się obecnością pętli sprzężenia zwrotnego [103].



Rys. 3. Przykład wielowarstwowej sieci MLP i sieci splotowej CNN [103].

2.1.8 Sieci neuronowe i głębokie uczenie

Terminy „głębokie uczenie” i „sieci neuronowe” są często używane zamiennie, co może prowadzić do nieporozumień. Słowo „głębokie” w „głębokim uczeniu” odnosi się wyłącznie do liczby warstw w sieci neuronowej. Sieć neuronowa składająca się z więcej niż trzech warstw – w tym warstw wejściowej i wyjściowej – może być uznana za algorytm głębokiego uczenia. Natomiast sieć neuronowa mająca jedynie dwie lub trzy warstwy to podstawowa sieć neuronowa. Struktura i zastosowanie głębokich sieci zostały już szczegółowo opisane, co znajduje odzwierciedlenie w liczbie publikacji w bazie danych PubMed. Jedną z nowszych publikacji, przedstawioną przez Chen i wsp. [65], stanowi interesujące i nowoczesne porównanie w kontekście omawianej skoliozy.

W latach 2019–2021 zainteresowanie sztuczną inteligencją oraz metodami takimi jak głębokie uczenie i uczenie maszynowe wzrosło w niespotykanym dotąd tempie. Przykładem ich zastosowania stała się walka z COVID-19. Rozwój algorytmów i metod głębokiego uczenia przyczynia się również do postępu w innych technikach obrazowania, a co za tym idzie – do diagnostyki niezwiązanej bezpośrednio z COVID-19. Tradycyjne metody przesiewowego wykrywania skoliozy są łatwo dostępne, jednak ze względu na niski dodatni współczynnik predykcji wymagają skierowań oraz ekspozycji na promieniowanie rentgenowskie. Zastosowanie algorytmów głębokiego uczenia może przyczynić się do ograniczenia niepotrzebnych skierowań, a tym samym do obniżenia kosztów badań przesiewowych w kierunku skoliozy. Jak dotąd pojawiło się niewiele publikacji bezpośrednio dotyczących zastosowania sztucznej inteligencji w diagnostyce skoliozy. Temat ten rozwija się dynamicznie, jednak techniki te nie są jeszcze stosowane w standardowej diagnostyce.

Yang i wsp. [66] przedstawili algorytm do identyfikacji przypadków z krzywizną $\geq 20^\circ$ oraz klasyfikacji stopnia skrzywienia na podstawie zdjęć odsłoniętych pleców. Uzyskane wyniki dotyczące dokładności, czułości, swoistości oraz dodatniej wartości predykcyjnej (PPV) były wyższe lub porównywalne z wynikami osiąganymi przez ekspertów. Zastosowanie algorytmów może zmniejszyć liczbę skierowań, obniżyć koszty oraz skrócić czas wymagany na tradycyjne badania przesiewowe w kierunku skoliozy. Co więcej, algorytmy głębokiego uczenia (DLA) nie wymagają ekspozycji na promieniowanie, dzięki czemu metoda ta może być stosowana do okresowego monitorowania postępu choroby, minimalizując konieczność wykonywania badań rentgenowskich. Zgodnie z posiadaną wiedzą, jest to pierwsze tak obszerne i kompleksowe badanie (obejmujące grupy kontrolne zdrowych osób oraz różne stopnie skrzywienia) dotyczące inteligentnego wykrywania skoliozy. Skuteczność zastosowania technik widzenia komputerowego w detekcji i klasyfikacji skoliozy została wykazana na podstawie analizy zdjęć odsłoniętych pleców.

Metody uczenia maszynowego zostały już wykorzystane do wykrywania deformacji kręgosłupa za pomocą powierzchni tułowia określanej różnymi technikami, w tym systemami cyfryzacji optycznej [67][68], mapami ortogonalnymi, technikami topografii powierzchni [69], skanerami laserowymi [70][71] oraz systemem Quantec [72]. Jednak te metody wciąż nie mogą być szeroko stosowane z powodu małych zestawów danych dotyczących skoliozy, braku zdrowych grup kontrolnych, potrzeby specjalistycznego sprzętu oraz czasochłonności tych metod. Zdaniem autorów, wyżej wymienione metody (z wyjątkiem zdjęć rentgenowskich) są w zupełności wystarczające. Ograniczenie stosowania obrazów rentgenowskich jest absolutnie zalecane i uzasadnione, gdy specjaliści dysponują alternatywnymi metodami wizualizacji.

2.1.9 Algorytm automatycznego pomiaru kąta Cobba w skoliozie oparty na głębokim uczeniu

Zhang i wsp. [73] zaproponowali komputerowo wspomaganą metodę pomiaru kąta Cobba opartą na transformacie Hougha, która umożliwia automatyczne obliczanie kąta Cobba po ręcznym wybraniu obszaru zainteresowania (ROI) końcowych okręgów oraz dostosowaniu jasności i kontrastu zdjęć rentgenowskich. Transformata Hougha, stosowana w wizji komputerowej do wykrywania regularnych kształtów, jest szczególnym przypadkiem transformacji Radona, znanej od 1917 roku. Temat ten rozwijał się stosunkowo szybko. W pracy Samuveli i wsp. [74] zaprezentowano algorytm pomiaru kąta Cobba oparty na segmentacji z zastosowaniem tzw. maski. W innym artykule Zhang [75] zaproponował algorytm oparty na głębokiej sieci neuronowej, który automatycznie szacuje nachylenie kręgosłupa po ręcznym

wybraniu obszaru zainteresowania w górnych i dolnych kręgach oraz pozwala na automatyczny pomiar kąta Cobba. Ponadto zaprojektowano programy wspomagające pomiar kąta i poprawiające efektywność pracy radiologów [76][77]. Okazało się, że programy te zwiększyły efektywność pomiaru kąta, jednak konieczność ręcznego wyboru górnych i dolnych końców kręgów pozostawała czasochłonna i subiektywna. Problem ten stał się impulsem do rozwoju bardziej precyzyjnych i stabilnych metod. Ulepszono algorytmy przetwarzania obrazu, w tym algorytmy wykrywania obiektów z użyciem uczenia maszynowego [78] oraz algorytmy automatycznej segmentacji obrazów [79]. W wyniku tego, przez kilka lat metody te zostały znacznie udoskonalone. Opisane powyżej techniki były związane z subiektywnym doświadczeniem klinicystów, co przyczyniło się do wysokiego błędu pomiaru kąta Cobba na zdjęciach rentgenowskich skoliozy. Yongcheng i wsp. [80] zaproponowali automatyczny algorytm oparty na głębokim uczeniu [81], który wykorzystuje sieć detekcji i segmentacji U-Net do segmentacji konturów kręgosłupa na zdjęciach rentgenowskich. Zebrane cechy kanałowe w algorytmie detekcji są wykorzystywane do wykrywania obszaru kręgosłupa na obrazie skoliozy. Sieć U-Net jest trenowana do segmentacji konturów kręgosłupa, dzięki czemu krzywa kręgosłupa może być dopasowana do konturu, a kąt Cobba automatycznie mierzony przy użyciu linii stycznej do tej krzywej. W rezultacie metoda automatycznego pomiaru kąta Cobba daje średni błąd wynoszący $2,9^\circ$ w porównaniu z ręcznym pomiarem wykonanym przez ortopedę.

Wcześniejsze metody oceny skoliozy oparte na segmentacji, takie jak filtracja [73][82], aktywne konturowanie [83] oraz modele fizyczne [84], lokalizowały wymagane kręgi i obliczały kąt Cobba. Metody te wymagają, aby użytkownik ręcznie wybierał okręgi, co stanowi ich ograniczenie. Do 2021 roku nie opracowano standardów, procedur ani procesów roboczych, które miałyby na celu standaryzację przeprowadzanej analizy oraz wyboru metod i algorytmów. W ostatnich latach dużym sukcesem cieszyły się metody bezpośredniej estymacji [85][86][87], które mają na celu uzyskanie zależności między obrazami medycznymi a pomiarami klinicznymi bezpośrednio, bez potrzeby stosowania wyników opartych na segmentacji. Metody te zostały zastosowane w pomiarze skoliozy [85][86][87]. Niestety, uwzględniają one tylko podstawową zależność między zdjęciami rentgenowskimi w projekcji AP (przednio-tylnej) i LAT (bocznej), nie biorąc pod uwagę unikalnych cech tych obrazów w różnych projekcjach. Z powodu tych ograniczeń Wang i wsp. [88] zaproponowali zautomatyzowaną metodę estymacji kąta Cobba w ocenie skoliozy przy użyciu MVE-Net. Prezentują oni, że MVE-Net skutecznie wykorzystuje zarówno cechy wspólne, jak i niezależne w obrazach rentgenowskich z różnych perspektyw. MVE-Net osiągnął wysoką precyzję w estymacji kąta Cobba zarówno w przypadku obrazów AP, jak i LAT, na dużym zbiorze 526 zdjęć rentgenowskich o różnych stopniach skoliozy. Metoda

obliczeniowa jest również rozszerzalna na inne zastosowania kliniczne, zapewniając wysoką precyzję estymacji.

Algorytmy głębokiego uczenia (DLA) z wykorzystaniem sieci neuronowych typu CNN, które były stosowane w detekcji skoliozy idiopatycznej, zostały opracowane na podstawie obrazów 2D [66] lub topografii Mory [17][89][90]. Kokabu i wsp. [91] zmodyfikowali swój system, aby jeszcze dokładniej przewidywać kąt Cobba, co pomyślnie zaprezentowali w swojej najnowszej publikacji [92].

2.1.10 Bazy danych zawierające obrazy kręgosłupa/skoliozy dostępne bezpłatnie

Pomimo licznych publikacji na temat skoliozy oraz porównań różnych metod, wciąż pojawiają się nowe opracowania. Jednym z takich artykułów, opublikowanym na początku 2021 roku, jest analiza łącząca dwa zagadnienia: skoliozę oraz zastosowanie uczenia maszynowego w jej diagnostyce. [93]. W związku z gwałtownym rozwojem technik uczenia maszynowego oraz tematem sztucznej inteligencji, warto zwrócić uwagę na bazy danych, które są kluczowe dla badań nad sztuczną inteligencją i diagnostyką skoliozy. Kilka baz danych dotyczących diagnostyki medycznej jest dostępnych bezpłatnie i wykorzystywanych przez badaczy na całym świecie, wśród nich wyróżnić można:

- PhysioNet,
- National Institutes of Health (NIH),
- Radiopaedia.org,
- ieee-dataport.org,
- Biomedica.

Podczas przeglądu zidentyfikowanych baz danych Autor niniejszej rozprawy zauważył trudność w pozyskiwaniu danych w postaci plików DICOM kręgosłupa w projekcji AP lub LAT, CT i MRI, które mogłyby zostać wykorzystane jako materiał do analizy komputerowej. W trakcie procesu poszukiwań Autor rozprawy znalazł bazę danych "SpineWeb", która zawiera kilka kolekcji, a dane z tej bazy zostały już wykorzystane w około 50 publikacjach naukowych. Na podstawie zebranych informacji opracowano tabelę (Tabela 1), która zawiera zidentyfikowane publikacje, w których autorzy korzystali z bazy danych „SpineWeb”.

Tabela 1. Publikacje dotyczące analizy obrazów kręgosłupa pochodzących z bazy „SpineWeb” (2019–2021).

Publikacja / Liczba danych	Zastosowany algorytmy	Badanie	Wyniki
Liansheng W. [88] 609 zdjęć RTG	Wielowidokowa Ekstrapolacyjna Sieć Neuronowa	Celem było stworzenie automatycznego systemu szacowania	Metoda osiągnęła średni błąd estymacji kąta Cobba wynoszący $\sim 3.7^\circ$.

Publikacja / Liczba danych	Zastosowany algorytm	Badanie	Wyniki
	(Multi-View Extrapolation Net - MV-E Net)	kąta Cobba, który potrafi działać nawet na pojedynczym widoku RTG. Podejście uwzględniało wzajemne zależności między widokami AP i bocznym, co pozwalało lepiej estymować przestrzenną deformację kręgosłupa.	Przewyższyła dotychczasowe techniki oparte na pojedynczym widoku. Udowodniono, że wielowidokowe uczenie i ekstrapolacja poprawiają dokładność diagnostyczną.
Liansheng W. [93] 707 zdjęć RTG	Sieć Neuronowa Splotowa (Convolutional Neural Network - CNN)	Celem badania było porównanie dokładności i skuteczności różnych algorytmów w zadaniu automatycznego szacowania krzywizny kręgosłupa (kąt Cobba) na obrazach RTG.	Najlepsze metody osiągnęły średni błąd poniżej 5° w ocenie kąta Cobba. Pokazano, że głębokie sieci neuronowe mogą osiągać skuteczność zbliżoną do ludzkich ekspertów. Porównanie metod pozwoiliło wyłonić najbardziej niezawodne podejścia do automatycznej oceny skoliozy.
Shumao P. [94] Obrazy MRI pochodzące od 215 osób	Sieć regresji z kaskadowym wzmacniaczem (Cascade Attention Residual Network - CARN)	Celem było automatyczne i bezpośrednie oszacowanie kątów Cobba i innych parametrów deformacji kręgosłupa. Metoda unikała etapów segmentacji i bezpośrednio przewidywała współrzędne punktów anatomicznych potrzebnych do obliczeń.	Model osiągnął średni błąd estymacji kąta Cobba poniżej 4°. Pokazano, że bezpośrednia regresja z pomocą CARN może być dokładniejsza i bardziej efektywna niż podejścia oparte na pośrednich krokach (np. segmentacji).
Jiawei H. [95] 141 obrazy MRI pochodzące od 45 pacjentów	Uczenie Związane z Wyrażną Świadomością Istotności (Explicit Saliency-Aware Learning - ESAL)	Celem było dokładne segmentowanie mięśni przykręgosłupowych (np. multifidus, erector spinae) w obrazach MRI na różnych poziomach kręgosłupa.	Proponowana metoda osiągnęła najwyższą dokładność (średni Dice ~91%) w porównaniu z innymi podejściami. Szczególnie skuteczna była w przypadkach z trudniejszą anatomią lub asymetrią mięśni.

Publikacja / Liczba danych	Zastosowany algorytmy	Badanie	Wyniki
Zhongyi H. [96] 302 obrazy MRI	Generatywna sieć przeciwna (Generative Adversarial Network - GAN)	Celem było automatyczne segmentowanie wielu struktur kręgosłupa w obrazach MRI. Podejście miało poprawić dokładność i spójność segmentacji w porównaniu z klasycznymi CNN lub U-Netami.	Spine-GAN osiągnął średni współczynnik Dice: 90%+ dla większości struktur (np. trzonów, kanału kręgowego). Pokazano, że podejście z GAN poprawia jakość i ciągłość granic w segmentacji. Metoda wykazała lepszą ogólną wydajność niż standardowe podejścia segmentacyjne.
Heyou Ch. [97] 292 obrazy MRI	Sieć Konwolucyjna Grafów (Graph convolutional network - GCN)	Celem było automatyczne segmentowanie wielu kręgów na obrazach MRI, niezależnie od tego, jaka część kręgosłupa jest widoczna.	Metoda osiągnęła średni współczynnik Dice powyżej 88% dla większości kręgów. Poprawiła ciągłość i dokładność segmentacji w porównaniu do modeli operujących tylko na lokalnym kontekście. Dobrze radziła sobie nawet z nietypowymi zakresami obrazów i zmienną pozycją pacjenta.
Ranran Z. [98] 407 pacjentów	Wielozadaniowa sieć relacyjna ucząca się (Multi- Task Relational Learning Network - MRLN)	Celem było stworzenie zintegrowanego systemu do kompleksowej analizy kręgosłupa w obrazach MRI.	MRLN osiągnął: średni błąd lokalizacji kręgu: < 2 mm, dokładność identyfikacji numeracji: ~93%, średni Dice dla segmentacji: ~90%. Udowodniono, że wspólne uczenie wielu zadań daje lepsze rezultaty niż uczenie każdego osobno.
Liyan L. [99] 143 pacjentów	Gęsta sieć wzmacniająca (Dense Enhancing Network – DE-Net)	Celem było automatyczne wyznaczanie wielu wskaźników osiowych kręgosłupa (m.in. wymiarów kanału kręgowego, położenia trzonów kręgów) z obrazów MRI. Zastosowano podejście, które integruje	Model osiągnął wysoką dokładność predykcji wskaźników – błędy poniżej 1.5 mm. W porównaniu z innymi metodami, uzyskano lepsze odwzorowanie relacji anatomicznych i strukturalnych. Udowodniono, że regularizacja przestrzenna

Publikacja / Liczba danych	Zastosowany algorytm	Badanie	Wyniki
		informacje z różnych przestrzeni obrazowych, by lepiej odzwierciedlać rzeczywistą anatomię.	poprawia spójność i precyzję wyników.
Yanfei H. [100] 200 pacjentów	Uczenie kontrastowe w trybie multimodalnym (Multi-Modal Contrastive Learning Network - MMCL-Net)	Celem było opracowanie uniwersalnego modelu do diagnozy chorób kręgosłupa na podstawie obrazów MRI. Podejście globalne pozwalało łączyć informacje z całego obrazu oraz lokalnych ognisk zmian.	Model osiągnął: dokładność klasyfikacji patologii: ~91%, średni Dice w segmentacji: ~89%, skuteczność lokalizacji zmian: >85%. Pokazano, że wielozadaniowe podejście poprawia ogólną jakość diagnozy w porównaniu do modeli jednofunkcyjnych.
Dong Z. [101] 240 pacjentów	Sekwencyjne warunkowe uczenie ze wzmocnieniem (Sequential Conditional Reinforcement Learning - SCRL)	Celem było opracowanie systemu do jednoczesnego wykrywania i segmentowania trzonów kręgów.	Model osiągnął: średni błąd lokalizacji: < 2 mm, średni współczynnik Dice dla segmentacji: ~91%.
Shen Z. [102] 450 obrazów MRI	Uczenie przeciwstawne z metodami optymalizującymi szybkość i dokładność rozpoznawania obiektów na obrazach (Faster Adversarial Recognition Network – FAR-Net)	Celem było opracowanie automatycznego systemu oceny stopnia spondylolistezy w obrazach MRI kręgosłupa. Model wykorzystywał różne modalności MRI (np. T1, T2), aby wykrywać i klasyfikować stopień przemieszczania kręgów.	Model osiągnął dokładność klasyfikacji stopnia spondylolistezy na poziomie 89%. Pokazano, że podejście z GAN przewyższyło tradycyjne metody klasyfikacyjne. FAR-Net wykazał większą odporność na zmienność obrazów w różnych modalnościach MRI.

Obecnie rozwój metod obliczeniowych oraz ich wdrożenie w medycynie przyczyniają się do usprawnienia procedur opieki zdrowotnej. Nowoczesne technologie nie tylko oszczędzają czas, ale, co istotne, minimalizują ryzyko błędów ludzkich. Niemniej jednak, metody oceny krzywizny kręgosłupa wciąż przechodzą dynamiczny rozwój, a wielu badaczy koncentruje się na opracowaniu w pełni skomputeryzowanej, ilościowej metody oceny tej krzywizny. Mimo posiadania zaawansowanych narzędzi diagnostycznych, wciąż napotykaną są trudności związane z powtarzalnością wyników oraz stosowaniem różnych metod statystycznych, co utrudnia porównywanie wyników badań. W związku z powyższym, celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest opracowanie metod automatycznej analizy asymetrii grzbietu oraz oceny krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa.

Pomimo zaawansowanego rozwoju narzędzi obliczeniowych, które wspomagają diagnostykę w medycynie, wyzwania związane z precyzyjną oceną krzywizny kręgosłupa wciąż pozostają aktualne. Z tego względu, szczególne znaczenie w tym kontekście zyskuje wczesne wykrywanie patologii kręgosłupa, w tym skoliozy, u dzieci i młodzieży. Istotną rolę w tym zakresie pełnią badania przesiewowe, które umożliwiają szybsze oraz dokładniejsze zidentyfikowanie problemów w obrębie kręgosłupa. W kolejnej części pracy omówione zostaną badania przesiewowe w diagnostyce skoliozy u dzieci i młodzieży, ze szczególnym uwzględnieniem ich znaczenia w procesie wczesnej diagnozy oraz profilaktyki.

2.2 Rola badań przesiewowych dzieci i młodzieży we wczesnej detekcji skoliozy

Jak wspomniano w pierwszym rozdziale niniejszej rozprawy, skolioza to deformacja boczna kręgosłupa, która może prowadzić do zniekształceń postawy ciała. W przypadku, gdy skolioza jest wykrywana we wczesnym etapie, przed rozpoczęciem dalszego postępu choroby, można zastosować odpowiednie metody leczenia, które zatrzymają lub spowolnią jej rozwój. Wczesna diagnoza pozwala na [104][105]:

- Monitorowanie postępów choroby: Umożliwia regularną kontrolę zmian w krzywiznach kręgosłupa i dostosowanie leczenia w zależności od tempa progresji skoliozy.
- Wczesne wdrożenie leczenia zachowawczego: Jeśli skolioza zostanie wykryta na wczesnym etapie, można zastosować takie metody jak gorset ortopedyczny, który

zapobiegnie dalszemu postępowi deformacji. W przypadku wykrycia skoliozy w późniejszym etapie, konieczność zastosowania chirurgii jest znacznie większa.

Skolioza może występować w każdym wieku, jednak szczególnym okresem, w którym dochodzi do rozwoju tej deformacji, są okresy wzrostu, szczególnie w okresie dojrzewania. Skolioza wrodzona występuje rzadziej, około 2-3% przypadków skoliozy, i jest zwykle rozpoznawana już w pierwszych miesiącach życia. Skolioza idiopatyczna dziecięca (do 3 roku życia) występuje u około 0.2% dzieci w tej grupie wiekowej. Jest mniej powszechna i często związana z innymi nieprawidłowościami w rozwoju układu kostnego. Skolioza idiopatyczna młodzieńcza (w wieku 10-18 lat) jest najczęściej występującym typem skoliozy, który obejmuje około 80% przypadków skoliozy ogólnie. Zwykle diagnozowana jest w okresie dojrzewania, kiedy krzywizny kręgosłupa mogą się pogłębiać w szybkim tempie. Z kolei skolioza dorosłych może występować u osób dorosłych, ale jest to wynik przewlekłej skoliozy, która rozwijała się w okresie dzieciństwa i młodzieży, ale nie była wcześniej rozpoznana [106][107].

Badania wykazują, że skolioza występuje częściej u dziewcząt niż u chłopców. W szczególności, w przypadku skoliozy idiopatycznej młodzieńczej (AIS - Adolescent Idiopathic Scoliosis), stosunek dziewcząt do chłopców wynosi 2:1 lub 3:1, co oznacza, że dziewczęta mają większą skłonność do rozwinięcia bardziej progresywnej skoliozy[108][109]. U chłopców skolioza często ma większą tendencję do progresji i jest bardziej skomplikowana. U dziewcząt w wieku 10-16 lat, częstość występowania skoliozy może wynosić około 2-3%, podczas gdy u chłopców jest to około 0.5-1% [108].

Skoliozy idiopatyczne mogą negatywnie wpływać na stan zdrowia poprzez ograniczenie wydolności układu oddechowego i krążeniowego, występowanie dolegliwości bólowych kręgosłupa o podłożu mechanicznym oraz niekorzystny wpływ na kondycję psychiczną pacjenta [108]. U pacjentów ze skoliozą idiopatyczną obserwuje się zmniejszenie pojemności i ograniczoną ruchomość klatki piersiowej, co prowadzi do zmiany wzorca oddychania. Stopień redukcji pojemności życiowej płuc oraz natężonej jednosekundowej pojemności wydechowej wykazuje dodatnią korelację z wartością kąta Cobba w odcinku piersiowym kręgosłupa. Dusznosc u chorych z ciężką skoliozą, zwłaszcza gdy skrzywienie przekracza 80° według Cobba, wynika ze zmian anatomicznych zachodzących w obrębie klatki piersiowej i płuc [108]. Osoby dorosłe ze skoliozą idiopatyczną, a niekiedy także młodzież, często skarżą się na bóle pleców, szczególnie w odcinku piersiowym oraz lędźwiowo-krzyżowym. Dolegliwości te wynikają przede wszystkim z

przeciążenia układu mięśniowo-powięziowego, zmian zwyrodnieniowych w obrębie stawów międzykręgowych oraz patologii krążków międzykręgowych [109]. Osoby dotknięte skoliozą idiopatyczną mają zazwyczaj niższą samoocenę w porównaniu do osób zdrowych, jednak nie wykazano zwiększonej częstości występowania zaburzeń psychicznych wymagających leczenia specjalistycznego [108].

Na chwilę obecną, jak wskazuje Komitet Rehabilitacji, Kultury Fizycznej i Integracji Społecznej Polskiej Akademii Nauk, nie funkcjonuje ujednolicony, wystandaryzowany system badań przesiewowych służących wczesnemu wykrywaniu skoliozy idiopatycznej. Brak takiego systemu niesie ze sobą ryzyko zarówno wystąpienia wyników fałszywie ujemnych, jak i fałszywie dodatnich. W przypadku fałszywie ujemnego wyniku badania, nieprawidłowość może pozostać niezauważona, co sprzyja progresji skoliozy i skutkuje koniecznością wdrożenia leczenia gorsetowego, a w bardziej zaawansowanych przypadkach – interwencji chirurgicznej. Natomiast wynik fałszywie dodatni generuje niepotrzebny stres zarówno u dziecka, jak i jego rodziców, prowadząc do wdrożenia nieuzasadnionych metod leczenia, co dodatkowo obciąża system ochrony zdrowia.

2.2.1 Zasady i cele badań przesiewowych

Badania przesiewowe (ang. screening) to procedury medyczne, które mają na celu wczesne wykrycie chorób lub nieprawidłowości w populacji, zanim pojawią się wyraźne objawy kliniczne. Są one stosowane głównie w odniesieniu do schorzeń, w których wczesna diagnoza i interwencja mogą znacząco poprawić rokowanie oraz zmniejszyć ryzyko powikłań [110]. W kontekście skoliozy idiopatycznej (SI) badania przesiewowe odgrywają kluczową rolę w identyfikacji dzieci i młodzieży, u których rozwija się skrzywienie kręgosłupa. Wczesne wykrycie skoliozy pozwala na wdrożenie skutecznych metod leczenia zachowawczego, takich jak ćwiczenia korekcyjne czy gorsetowanie, zanim deformacja osiągnie zaawansowane stadium wymagające leczenia operacyjnego [105].

Celem badań przesiewowych w diagnostyce skoliozy jest:

- identyfikacja osób zagrożonych progresją skoliozy, zanim skrzywienie stanie się poważne i będzie wymagało inwazyjnych metod leczenia [111]. Badania pokazują, że SI wykryta na wczesnym etapie, gdy kąt Cobba wynosi 10–20°, daje szansę na skuteczną korekcję bez konieczności operacji [112].
- minimalizacja ryzyka progresji skoliozy. Bez wczesnej diagnostyki skolioza może postępować do wartości powyżej 40–50° Cobba, co często wiąże się z koniecznością

interwencji chirurgicznej. Badania przesiewowe umożliwiają monitorowanie pacjentów z łagodnymi skrzywieniami i kierowanie ich na regularne kontrole ortopedyczne [113].

- uniknięcie poważnych konsekwencji zdrowotnych. Zaawansowana skolioza może prowadzić do poważnych problemów zdrowotnych, takich jak zaburzenia oddychania, bóle pleców oraz ograniczenie sprawności fizycznej [108]. Dzięki badaniom przesiewowym można zapobiec negatywnemu wpływowi skoliozy na układ krążeniowo-oddechowy oraz na jakość życia pacjentów.
- zmniejszenie kosztów leczenia. Profilaktyka i wczesne leczenie skoliozy jest mniej kosztowne niż późniejsze leczenie operacyjne i długotrwała rehabilitacja. Koszty związane z operacyjnym leczeniem skoliozy oraz późniejszą rekonwalescencją są wielokrotnie wyższe niż nakłady na badania przesiewowe i wczesną interwencję [114].
- poprawa świadomości zdrowotnej społeczeństwa. Regularne badania przesiewowe w szkołach oraz programy edukacyjne pomagają zwiększyć świadomość na temat skoliozy wśród rodziców i nauczycieli. Dzięki temu możliwe jest szybsze zauważenie pierwszych objawów skrzywienia i skierowanie dziecka do specjalisty [115].

Efektywne badania przesiewowe w kierunku skoliozy powinny spełniać określone kryteria, aby były skuteczne i opłacalne. Przede wszystkim skolioza idiopatyczna jest schorzeniem o istotnym znaczeniu zdrowotnym, ponieważ może prowadzić do poważnych deformacji kręgosłupa, bólu oraz ograniczenia funkcji oddechowych [116]. Kluczowe jest wczesne wykrycie choroby, które umożliwia wdrożenie skutecznych metod leczenia, takich jak ćwiczenia korekcyjne, noszenie gorsetu ortopedycznego, a w cięższych przypadkach – leczenie operacyjne [108]. Badania przesiewowe powinny być łatwe do wykonania, szybkie i możliwe do przeprowadzenia w szkołach lub gabinetach lekarskich. Najczęściej stosowaną metodą jest test Adamsa (test skłonu w przód), który nie wymaga specjalistycznego sprzętu [117]. W razie potrzeby można zastosować skoliometr do dokładniejszych pomiarów. Badanie powinno być w pełni bezpieczne i nieinwazyjne, a diagnostyka radiologiczna (RTG) powinna być stosowana jedynie w uzasadnionych przypadkach, aby ograniczyć ekspozycję na promieniowanie. Program przesiewowy musi być dostępny i niskokosztowy, co można osiągnąć dzięki realizacji badań w szkołach przez pielęgniarki, fizjoterapeutów lub lekarzy. Kluczowe jest również zapewnienie wysokiej czułości testów, aby wykryć jak najwięcej przypadków skoliozy, oraz wysokiej swoistości, by uniknąć niepotrzebnych skierowań na dalszą diagnostykę [118].

Badania przesiewowe powinny być powtarzane w kluczowych okresach wzrostu dziecka – około 6.–7. roku życia oraz w okresie intensywnego dojrzewania (10–14 lat u dziewcząt, 11–16 lat u chłopców). Skuteczność programu zależy także od akceptacji społecznej i dobrej organizacji, dlatego ważne jest zwiększanie świadomości rodziców, nauczycieli i lekarzy na temat skoliozy oraz zapewnienie sprawnego systemu kierowania dzieci na dalszą diagnostykę i leczenie [119].

Jak widać z powyższego, badania przesiewowe w diagnostyce skoliozy mają kluczowe znaczenie dla wczesnego wykrycia choroby i wdrożenia skutecznego leczenia. Dzięki nim można zapobiec progresji skrzywienia, uniknąć powikłań zdrowotnych i zmniejszyć koszty leczenia. W związku z tym wiele krajów wdrożyło narodowe programy przesiewowe, jednak wciąż trwają dyskusje nad ich efektywnością i optymalnymi strategiami wdrażania.

2.2.2 Przesiewowe programy badań skoliozy w Polsce i na świecie

Badania przesiewowe w kierunku skoliozy prowadzone są w wielu krajach na świecie, ale ich organizacja, skuteczność oraz powszechność różnią się w zależności od systemu ochrony zdrowia i podejścia do profilaktyki. Programy te mają na celu wczesne wykrycie skoliozy idiopatycznej u dzieci i młodzieży, co pozwala na wdrożenie odpowiedniego leczenia i zapobieganie progresji choroby.

2.2.2.1 Polska

W Polsce badania przesiewowe w kierunku skoliozy są przeprowadzane głównie w szkołach podstawowych i średnich przez pielęgniarki szkolne, lekarzy POZ lub fizjoterapeutów. Standardową metodą jest test Adamsa (test skłonu w przód), który pozwala na ocenę asymetrii tułowia. W przypadku podejrzenia skoliozy dziecko jest kierowane na dalszą diagnostykę do poradni ortopedycznej, gdzie wykonuje się badanie kliniczne oraz w uzasadnionych przypadkach zdjęcie RTG [108].

Nie istnieje obecnie obowiązkowy, jednolity ogólnokrajowy program badań przesiewowych w kierunku skoliozy. Badania przeprowadzane są w ramach badań bilansowych oraz inicjatyw lokalnych, np. programów miejskich i wojewódzkich. Ich skuteczność zależy od dostępności specjalistów oraz świadomości rodziców i nauczycieli na temat profilaktyki wad postawy [108].

W kontekście badań przesiewowych w kierunku skoliozy w Polsce warto nawiązać do rekomendacji zawartych w dokumencie „Rekomendacje Komitetu Rehabilitacji, Kultury Fizycznej i Integracji Społecznej Polskiej Akademii Nauk”, który stanowi ważny głos w sprawie organizacji i przeprowadzania badań przesiewowych w kierunku skoliozy w Polsce. Komitet ten, analizując sytuację zdrowotną dzieci i młodzieży, podkreśla konieczność wdrożenia systemowego

podejścia do wykrywania skoliozy oraz innych wad postawy w celu poprawy profilaktyki i wczesnej diagnostyki. Dokument ten wskazuje, że badania przesiewowe w Polsce są zbyt fragmentaryczne i niejednolite, co powoduje, że wykrywalność skoliozy jest ograniczona. Zamiast powszechnych, obowiązkowych badań przesiewowych, stosowane są jedynie badania bilansowe i inicjatywy lokalne, które nie zawsze docierają do wszystkich dzieci, zwłaszcza w rejonach o niższej dostępności specjalistów [108]. Komitet Rehabilitacji PAN zwraca uwagę, że brak jednolitego programu ogólnokrajowego ogranicza skuteczność działań profilaktycznych.

Zalecenia zawarte w dokumencie podkreślają potrzebę stworzenia ogólnokrajowego systemu przesiewowych badań skoliozy, który obejmowałby wszystkie dzieci w kluczowych okresach wzrostu, tj. w wieku 6–7 lat oraz w okresie dojrzewania (10–14 lat u dziewcząt i 11–16 lat u chłopców) [108]. Wprowadzenie takiego systemu mogłoby przyczynić się do wcześniejszego wykrywania skoliozy i innych deformacji postawy, co umożliwiłoby szybsze wdrożenie skutecznego leczenia, w tym stosowanie ćwiczeń korekcyjnych czy, w bardziej zaawansowanych przypadkach, gorsetów ortopedycznych. Komitet Rehabilitacji PAN proponuje również, aby badania te były przeprowadzane przez specjalistów, takich jak fizjoterapeuci czy pielęgniarki szkolne, a w przypadku wykrycia nieprawidłowości, dzieci były kierowane na dalszą diagnostykę do poradni ortopedycznych, co pozwala na wczesną interwencję. Zgodnie z rekomendacjami, powinny być wykorzystywane nieinwazyjne i łatwe do przeprowadzenia metody, jak test Adamsa i skoliometr, a bardziej zaawansowane metody diagnostyczne, jak zdjęcia RTG, stosowane tylko w uzasadnionych przypadkach, aby ograniczyć narażenie dzieci na promieniowanie [108].

Rekomendacje Komitetu Rehabilitacji PAN wyraźnie wskazują na konieczność wprowadzenia jednolitego systemu badań przesiewowych w Polsce, co mogłoby przyczynić się do znacznego zwiększenia skuteczności wykrywania skoliozy w jej wczesnych stadiach i tym samym poprawy zdrowia młodego pokolenia. To podejście mogłoby stanowić podstawę do dalszych działań na poziomie centralnym, które sprzyjałyby większej dostępności badań i zmniejszyłyby nierówności w dostępie do opieki zdrowotnej.

2.2.2.2 Stany Zjednoczone

W USA badania przesiewowe w kierunku skoliozy były powszechne w szkołach, ale obecnie ich realizacja zależy od stanu. Niektóre stany, takie jak Kalifornia i Nowy Jork, wymagają rutynowych badań przesiewowych w szkołach, podczas gdy inne je wycofały ze względu na brak jednoznacznych dowodów na skuteczność masowego screeningu [120]. Warto zauważyć, że

decyzje o przeprowadzaniu badań przesiewowych są często podejmowane na poziomie stanowym, co prowadzi do różnorodności w dostępności tych badań w różnych częściach kraju [121].

American Academy of Orthopaedic Surgeons (AAOS) i Scoliosis Research Society (SRS) zalecają przeprowadzanie badań przesiewowych w wieku 10 i 12 lat u dziewcząt oraz 13 lub 14 lat u chłopców, co odpowiada okresom największego wzrostu, kiedy skolioza może się rozwijać [122]. Zalecane metody diagnostyczne to test Adamsa (test skłonu w przód), który pozwala na ocenę asymetrii tułowia, oraz skoliometr używany do pomiaru kąta rotacji tułowia, co jest kluczowe w ocenie stopnia zaawansowania deformacji [120].

W przypadku wykrycia nieprawidłowości w czasie testu, pacjenci są kierowani na dalszą diagnostykę, która obejmuje zdjęcia radiologiczne oraz konsultacje ortopedyczne. Warto dodać, że choć rutynowe badania w szkołach są powszechne w niektórych stanach, w innych, z powodu braku wystarczających dowodów na skuteczność masowego screeningu, badania te zostały ograniczone [120].

2.2.2.3 Niemcy

W Niemczech badania przesiewowe w kierunku skoliozy są częścią tzw. U- Untersuchungen, czyli obowiązkowych badań bilansowych dzieci przeprowadzanych przez pediatrów [123]. Te badania obejmują ocenę ogólnego stanu zdrowia dziecka, w tym badanie postawy ciała, co pozwala na wczesne wykrycie nieprawidłowości, w tym skoliozy. Jeśli pediatra stwierdzi jakiegokolwiek nieprawidłowości w postawie, dziecko jest kierowane na dalszą diagnostykę do specjalisty, najczęściej ortopedy, który przeprowadza szczegółowe badania, w tym testy kliniczne i, w razie potrzeby, zleca badania radiologiczne [123].

Nie ma obowiązkowych badań przesiewowych w szkołach, jednak, pomimo tego niemiecki system zdrowia kładzie duży nacisk na edukację w zakresie profilaktyki, co może przyczynić się do wcześniejszego wykrywania skoliozy i innych problemów posturalnych [123].

2.2.2.4 Japonia

Japonia prowadzi jeden z najbardziej rozwiniętych programów badań przesiewowych w kierunku skoliozy na świecie. Rutynowe badania przesiewowe są przeprowadzane w szkołach podstawowych i średnich, co zapewnia szeroki zasięg i umożliwia wczesne wykrycie skoliozy u dzieci i młodzieży [124]. W ramach tych badań, przeprowadzanych przez nauczycieli wychowania fizycznego lub specjalistów, stosuje się m.in. test Adamsa oraz skoliometr do oceny kąta rotacji tułowia. Dzięki temu możliwe jest szybkie wychwycenie nawet drobnych nieprawidłowości w postawie ciała [125].

Japoński system przesiewowych badań skoliozy wyróżnia się wysoką skutecznością, ponieważ badania są powszechnie dostępne, łatwe do przeprowadzenia i systematyczne. W przypadku wykrycia nieprawidłowości dzieci są natychmiastowo kierowane do dalszej diagnostyki ortopedycznej, gdzie ortopedzi wykonują dokładniejsze badania i, w razie potrzeby, zlecają zdjęcia RTG [124][125]. Dzięki temu możliwe jest wczesne wdrożenie leczenia, takie jak stosowanie gorsetów ortopedycznych, a w bardziej zaawansowanych przypadkach również interwencje chirurgiczne. Skuteczność tego systemu jest wysoka, co pozwala na monitorowanie postępów skoliozy i odpowiednie dostosowanie metod leczenia do indywidualnych potrzeb pacjentów.

Jak widać, podejście do badań przesiewowych w kierunku skoliozy różni się w zależności od kraju. Niektóre państwa, jak Japonia, wprowadziły obowiązkowe programy szkolne, podczas gdy inne, jak Niemcy, opierają się na diagnostyce w gabinetach lekarskich. Kluczowe znaczenie dla skuteczności programów mają dostępność badań, ich koszt oraz świadomość społeczeństwa na temat skoliozy. W Polsce brakuje jednolitego programu badań przesiewowych, co sprawia, że skuteczność wczesnej diagnostyki jest zależna od inicjatyw lokalnych oraz indywidualnego zaangażowania lekarzy i rodziców. Dążenie do optymalizacji metod badań przesiewowych, ich powszechnej dostępności oraz edukacji społeczeństwa może przyczynić się do skuteczniejszego wykrywania skoliozy i ograniczenia poważnych konsekwencji zdrowotnych tej choroby.

2.2.3 Korzyści z wczesnej diagnozy skoliozy

Wczesna diagnoza skoliozy wiąże się z wieloma korzyściami zdrowotnymi i społecznymi. Skolioza, czyli skrzywienie kręgosłupa w płaszczyźnie czołowej, może prowadzić do poważnych komplikacji, jeśli nie zostanie wcześniej wykryta i odpowiednio leczona. Dlatego przesiewowe badania skoliozy, przeprowadzane u dzieci w fazie wzrostu, są kluczowe w zapobieganiu dalszym problemom zdrowotnym, redukcji kosztów leczenia oraz poprawie jakości życia pacjentów.

Wczesne wykrycie skoliozy pozwala na zastosowanie mniej inwazyjnych metod leczenia, które zapobiegają postępowi choroby. U dzieci, u których skolioza jest rozpoznana na wczesnym etapie, możliwe jest zastosowanie terapii hamujących lub odwracających postęp deformacji. Jednym z najskuteczniejszych rozwiązań jest gorset ortopedyczny, który stabilizuje kręgosłup i zapobiega dalszemu wyginaniu się. Gorsety ortopedyczne są szczególnie efektywne u dzieci w okresie wzrostu, gdyż ich układ kostny jest bardziej elastyczny i podatny na korekcję [126]. Wczesne rozpoznanie skoliozy zmniejsza także ryzyko konieczności przeprowadzania operacji

chirurgicznych, które wiążą się z większymi komplikacjami oraz długotrwałą rehabilitacją [126][127].

Również jakość życia dzieci z wczesną diagnozą skoliozy ulega znaczącej poprawie. W bardziej zaawansowanych stadiach choroby skolioza może prowadzić do przewlekłego bólu pleców, ograniczenia zakresu ruchu czy problemów z oddychaniem, zwłaszcza gdy deformacje wywierają nacisk na narządy wewnętrzne [126][127]. Wczesne leczenie zmniejsza ryzyko wystąpienia tych powikłań, poprawiając zdolność dzieci do uczestniczenia w zajęciach szkolnych i aktywności fizycznej. Dodatkowo, stosowanie gorsetów ortopedycznych oraz rehabilitacja, które są częstymi metodami leczenia w początkowych stadiach choroby, przyczyniają się do poprawy postawy ciała i zmniejszenia dolegliwości bólowych [128]. Wczesne wykrycie skoliozy zmniejsza także ryzyko wystąpienia problemów emocjonalnych i psychicznych, związanych z kompleksami dotyczącymi wyglądu oraz ograniczeniami fizycznymi.

Wczesne wykrywanie skoliozy pozwala również na znaczne obniżenie kosztów leczenia. W początkowej fazie choroby leczenie jest tańsze i mniej skomplikowane niż w przypadku bardziej zaawansowanych deformacji. Gdy skolioza jest wykryta w początkowej fazie, możliwe jest zastosowanie gorsetów ortopedycznych lub ćwiczeń korekcyjnych, co stanowi tańszą alternatywę dla operacji wymagających hospitalizacji, znieczulenia ogólnego oraz długotrwałej rehabilitacji [127][128]. Dlatego wczesne diagnozowanie skoliozy przyczynia się nie tylko do korzyści zdrowotnych dla pacjentów, ale także pomaga w redukcji ogólnych kosztów systemu opieki zdrowotnej. Leczenie zaawansowanej skoliozy wiąże się z dużymi wydatkami, w tym na procedury chirurgiczne, co stanowi duże obciążenie finansowe dla pacjentów i systemów opieki zdrowotnej. Wczesna interwencja pozwala na lepsze zarządzanie zasobami zdrowotnymi, a także zmniejsza wydatki na długoterminowe leczenie [126][127].

Wczesna diagnoza skoliozy wiąże się z wieloma korzyściami, zarówno zdrowotnymi, jak i ekonomicznymi. Dzięki wczesnemu wykryciu możliwe jest zastosowanie mniej inwazyjnych metod leczenia, takich jak gorset ortopedyczny, co zmniejsza ryzyko postępu choroby oraz komplikacji zdrowotnych. Wczesna interwencja pozwala również uniknąć przewlekłego bólu i deformacji, co poprawia jakość życia dzieci i młodzieży. Ponadto, wcześniejsze leczenie skoliozy wiąże się z mniejszymi kosztami, co wpływa korzystnie na systemy opieki zdrowotnej.

2.2.4 Wyzwania związane z implementacją badań przesiewowych

Wprowadzenie skutecznych programów przesiewowych w kierunku skoliozy w populacji dzieci i młodzieży stanowi istotny krok w zapobieganiu postępowi tej choroby i minimalizowaniu jej negatywnych skutków zdrowotnych. Niemniej jednak, implementacja i optymalizacja takich

badan napotykają na szereg wyzwań, które obejmują zarówno kwestie organizacyjne, jak i finansowe, techniczne oraz społeczne.

W niniejszym podrozdziale przedstawione zostaną zidentyfikowane przez autora rozprawy kluczowe trudności związane z wprowadzeniem powszechnych badań przesiewowych w kierunku skoliozy, a także możliwe strategie ich rozwiązania.

Jednym z głównych wyzwań związanych z implementacją badań przesiewowych w kierunku skoliozy jest kwestia organizacyjna, związana z koordynowaniem i zarządzaniem całym procesem diagnostycznym. W wielu krajach, szczególnie w przypadku braku centralnego programu badań, nie ma jednolitego systemu przesiewowego, co sprawia, że inicjatywy są często lokalne lub oparte na działaniach poszczególnych placówek medycznych czy szkół [108]. Brak centralnej organizacji utrudnia spójne i efektywne wdrożenie badań, a także prowadzi do nierówności w dostępie do diagnozy. W krajach, gdzie badania przesiewowe nie są obowiązkowe, nie wszystkie szkoły czy instytucje edukacyjne podejmują działania w tym zakresie, co może prowadzić do sytuacji, w których nie wszystkie dzieci są objęte diagnozą skoliozy. Dodatkowo, organizacja badań przesiewowych w szkołach wiąże się z koniecznością współpracy różnych instytucji, takich jak placówki oświatowe, służba zdrowia, a także samorządy. Koordynowanie takich działań wymaga efektywnego systemu komunikacji oraz zaangażowania ze strony wszystkich stron, co bywa czasochłonne i trudne do zrealizowania, zwłaszcza w przypadku niedoboru zasobów [108]. Wprowadzenie odpowiednich procedur, takich jak systematyczne badania w szkołach, może napotkać trudności w związku z brakiem odpowiednich zasobów, np. personelu medycznego, który byłby w stanie przeprowadzić takie badania na szeroką skalę.

Innym ważnym wyzwaniem związanym z implementacją badań przesiewowych jest kwestia finansowa. Wprowadzenie powszechnych badań w kierunku skoliozy wiąże się z dodatkowymi kosztami, zarówno na etapie organizacyjnym, jak i diagnostycznym. Koszt wykonania podstawowych badań, takich jak test Adamsa czy badanie postawy ciała, może być stosunkowo niski, jednak wprowadzenie nowoczesnych technologii, takich jak tomografia komputerowa (CT) czy rezonans magnetyczny (MRI), wiąże się z dużymi wydatkami. Takie technologie, choć skuteczne, nie są powszechnie dostępne i mogą być kosztowne, co stanowi barierę w ich szerokim wdrożeniu w ramach powszechnych badań przesiewowych. Ponadto, istnieje potrzeba finansowania szkoleń dla personelu medycznego, który będzie odpowiedzialny za przeprowadzanie badań oraz interpretację wyników. Szerokie programy edukacyjne i informacyjne skierowane do nauczycieli, rodziców oraz dzieci, mające na celu zwiększenie świadomości na temat skoliozy, również wiążą się z kosztami. Przewidywalność kosztów, szczególnie w długoterminowym aspekcie, może stanowić wyzwanie dla instytucji

odpowiedzialnych za finansowanie opieki zdrowotnej, zwłaszcza w krajach o ograniczonych zasobach finansowych.

Inwestycja w nowoczesne technologie diagnostyczne, takie jak systemy 3D do analizy postawy ciała, czy innowacyjne urządzenia pomiarowe może przynieść znaczące korzyści w zakresie skuteczności badań przesiewowych. Jednakże, rozwój i implementacja takich technologii wiąże się z wyzwaniami technicznymi. Przede wszystkim, nowoczesne technologie wymagają odpowiedniego sprzętu, który może być kosztowny, a także zapewnienia odpowiedniego szkolenia dla personelu w zakresie obsługi tych urządzeń. Ponadto, w przypadku stosowania cyfrowych narzędzi diagnostycznych, takich jak aplikacje mobilne do analizy postawy ciała, konieczne jest zapewnienie ich powszechnej dostępności. Aplikacje takie muszą być kompatybilne z szeroką gamą urządzeń mobilnych, co wiąże się z dodatkowymi wymaganiami technicznymi. Wprowadzenie takich narzędzi w ramach powszechnych badań przesiewowych może być utrudnione w obszarach, gdzie dostęp do technologii jest ograniczony, a także wśród osób, które nie posiadają odpowiednich urządzeń mobilnych.

Kolejnym wyzwaniem w kontekście badań przesiewowych jest kwestia edukacji i świadomości społecznej. W wielu przypadkach rodzice, nauczyciele i sami pacjenci nie są w pełni świadomi problemu skoliozy i jej potencjalnych konsekwencji zdrowotnych. W krajach, w których nie ma powszechnych programów badań, często zdarza się, że skolioza jest wykrywana dopiero w zaawansowanym stadium, gdy deformacje są już poważne i trudniejsze do skorygowania. Zwiększenie świadomości społecznej na temat skoliozy, jej wczesnych objawów oraz korzyści wynikających z wczesnej diagnozy, jest kluczowe dla sukcesu wszelkich programów przesiewowych. Ważne jest, aby systemy edukacyjne wprowadzały odpowiednie programy szkoleniowe dla nauczycieli, które umożliwią im wczesne identyfikowanie dzieci, które mogą wymagać dalszej diagnostyki.

W kontekście skoliozy, wczesne wykrycie i odpowiednia interwencja są kluczowe dla dalszego rozwoju i jakości życia pacjentów. Niemniej jednak, jak pokazuje analiza obecnego stanu badań przesiewowych, organizacja takich działań różni się w zależności od kraju. W Polsce brak jednolitego systemu badań przesiewowych prowadzi do rozproszenia działań, co wpływa na skuteczność wykrywania skoliozy. Dlatego niezbędne jest stworzenie systemowego podejścia, które obejmowałoby całą populację dzieci w okresach kluczowych dla rozwoju choroby. W związku z koniecznością poprawy procesu wczesnego wykrywania skoliozy, szczególną uwagę warto zwrócić na narzędzia diagnostyczne, które wspierają ten proces. Jednym z takich narzędzi, wykorzystywanych zarówno w diagnostyce, jak i monitorowaniu postępów leczenia, jest

skoliometr Bunnella. Jest to mechaniczny inklinometr, który odgrywa kluczową rolę w ortopedii, szczególnie w ocenie asymetrii tułowia i diagnozowaniu skoliozy. W kolejnym rozdziale zostaną omówione narzędzia diagnostyczne powszechnie stosowane w diagnostyce skoliozy.

2.3 Skoliometr Bunnella i jego elektroniczne wersje

Skoliometr Bunnella to mechaniczny inklinometr, który jest używany w ortopedii, głównie do mierzenia asymetrii tułowia, szczególnie w przypadku diagnozowania skoliozy. Jest to narzędzie, które pozwala na precyzyjne pomiary kątów skrzywienia kręgosłupa, co jest kluczowe w ocenie stopnia deformacji oraz monitorowaniu postępów leczenia [129]. Charakterystyczną cechą skoliometru Bunnella jest to, że posiada wycięcie, które umożliwia precyzyjne przyłożenie urządzenia do wyrostków kolczystych kręgosłupa, Rys.4. Pozwala to na precyzyjne określenie kąta rotacji tułowia (KRT) w zakresie od 0 do 30 stopni, co jest kluczowe w ocenie stopnia deformacji oraz monitorowaniu postępów leczenia [129]. Pomiar opiera się na kącie skrzywienia tułowia, a wynik jest wyrażony w stopniach. Jest to jedno z najczęściej wykorzystywanych narzędzi w diagnostyce skoliozy w warunkach klinicznych, ponieważ jest stosunkowo proste w obsłudze, a pomiar jest szybki i dokładny. Może być także używany do oceny postawy ciała w celu wykrycia ewentualnych asymetrii przed wystąpieniem zauważalnych objawów skoliozy.



Rys. 4. Skoliometr Bunnella – przyrząd do pomiaru asymetrii tułowia stosowany w diagnostyce skoliozy, źródło: [129].

Rozwój technologii pomiarowych znacząco wpłynął na metody oceny i sposób monitorowania skoliozy. Coraz większą popularność zyskują elektroniczne urządzenia diagnostyczne, które oferują większą dokładność oraz łatwiejszy dostęp do wyników. Jednym z najczęściej stosowanych narzędzi pozostaje skoliometr, charakteryzujący się wysoką czułością i

specyfiką w wykrywaniu skoliozy. Nowoczesne wersje skoliometrów są często wzbogacone o funkcje cyfrowe, co ułatwia zbieranie i analizowanie danych.

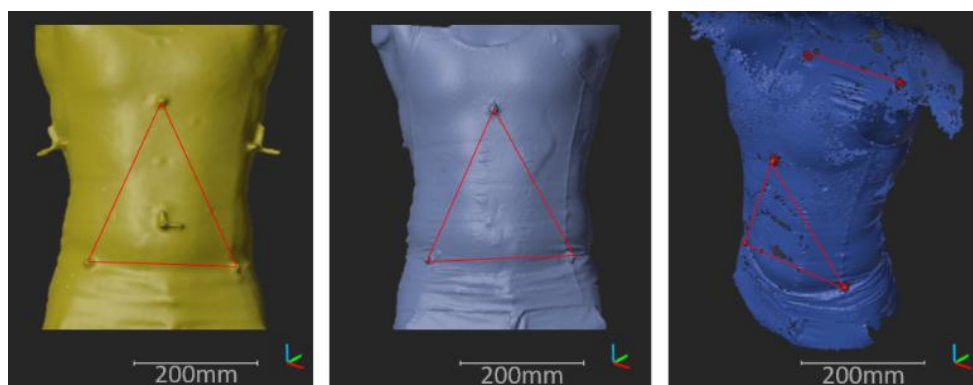
W ostatnich latach wzrosło zainteresowanie nowoczesnymi metodami pomiaru skoliozy, szczególnie w kontekście technologii takich jak skanowanie 3D, ultrasonografia czy aplikacje mobilne. Badania koncentrują się na poprawie dokładności i niezawodności metod diagnostycznych, co jest kluczowe dla wczesnego wykrywania oraz monitorowania postępu choroby. Jednym z przykładów jest publikacja [132], w której przeanalizowano skuteczność nowego cyfrowego skoliometru – Scolioscope (Rys.5). Badanie to ma istotne znaczenie, ponieważ tradycyjne, analogowe skoliometry często wykazują ograniczenia w zakresie precyzji i dokładności diagnostycznej, co może prowadzić do błędnych ocen stanu pacjentów [132]. W przeprowadzonych testach oceniono niezawodność wewnętrzną oraz dokładność pomiarów Scolioscope, porównując go z tradycyjnymi metodami, takimi jak test Adamsa oraz zdjęcia rentgenowskie. Wyniki badań wykazały wysoką powtarzalność pomiarów, co sugeruje, że może być skutecznym narzędziem w diagnostyce skoliozy.



Rys. 5. Cyfrowy skoliometr Scolioscope, źródło: [132].

Systemy skanowania 3D stanowią kolejne istotne narzędzie diagnostyczne, umożliwiające dokładną analizę kształtu ciała pacjenta. Dostarczają one szczegółowych informacji na temat geometrii ciała, co ma kluczowe znaczenie w projektowaniu aparatów ortopedycznych. Są szczególnie przydatne w monitorowaniu postępu skoliozy u dzieci z zaburzeniami neurologicznymi, ponieważ pozwalają na precyzyjną ocenę zmian w budowie ciała podczas wzrostu. Badanie przeprowadzone przez Sanz-Pena i współautorów koncentruje się na ocenie dokładności oraz powtarzalności ręcznych skanerów 3D w uzyskiwaniu geometrii torsu pacjentów ze skoliozą, co ma kluczowe znaczenie dla projektowania indywidualnie dopasowanych gorsetów ortopedycznych [134]. Autorzy przeanalizowali różne modele skanerów pod kątem ich precyzji oraz zdolności do odtwarzania tych samych wyników przy wielokrotnych pomiarach, Rys.6.

Wyniki badania wskazują, że ręczne skanery 3D mogą zapewnić wystarczającą dokładność, choć ich skuteczność zależy od czynników takich jak doświadczenie operatora, warunki skanowania oraz specyfika technologii stosowanej w danym urządzeniu. Analiza powtarzalności wykazała, że niewielkie różnice między kolejnymi pomiarami mogą mieć wpływ na ostateczny kształt projektowanego gorsetu. Autorzy podkreślają, że zastosowanie skanerów 3D może usprawnić proces tworzenia ortez poprzez eliminację błędów wynikających z tradycyjnych metod pomiarowych, takich jak gipsowe odlewy, co przekłada się na większy komfort i skuteczność leczenia pacjentów.



Rys. 6. Skany uzyskane przez Sanz-Pena za pomocą ręcznych skanerów 3D. Zostały one wykorzystane do oceny geometrii torsu pacjentów ze skoliozą oraz porównania różnych metod skanowania pod kątem ich przydatności w projektowaniu gorsetów ortopedycznych, źródło: [134].

Aplikacje mobilne to kolejna innowacja, która pozwala użytkownikom na samodzielne monitorowanie postawy ciała. Wykorzystują one technologię rozpoznawania obrazu do analizy zdjęć wykonanych przez użytkowników, co umożliwia wczesne wykrywanie oznak skoliozy w warunkach domowych. Przykładowo, badacze w pracy [140] skupili się na stworzeniu prostego i skutecznego narzędzia umożliwiającego wczesne wykrywanie skoliozy na odległość, co mogłoby poprawić dostępność diagnostyki i skrócić czas do rozpoczęcia leczenia. Autorzy przeprowadzili badanie na grupie pacjentów w różnym wieku, analizując skuteczność nowego testu tele-screeningowego w porównaniu z tradycyjnymi metodami wykrywania skoliozy. Do oceny wykorzystano zarówno standardowe badania kliniczne, jak i technologie telemedyczne. Test uwzględniał analizę postawy ciała za pomocą zdjęć oraz filmów przesyłanych przez pacjentów, które następnie były oceniane przez specjalistów pod kątem nieprawidłowości wskazujących na skoliozę. Badanie wykazało, że opracowany test tele-screeningowy charakteryzuje się wysoką czułością i specyficznością w wykrywaniu ryzyka skoliozy. Wyniki testu dobrze korelowały z wynikami uzyskanymi w tradycyjnych badaniach ortopedycznych, co

potwierdza jego skuteczność jako narzędzia diagnostycznego. Ponadto metoda ta okazała się szczególnie przydatna w rejonach o ograniczonym dostępie do specjalistycznej opieki medycznej, umożliwiając wcześniejsze wykrywanie przypadków wymagających dalszej diagnostyki. Nowe narzędzie tele-screeningowe może stanowić skuteczną metodę wczesnego wykrywania skoliozy, zwłaszcza w populacjach o ograniczonym dostępie do opieki ortopedycznej. Może być używane jako pierwsza linia diagnostyczna, pomagając w identyfikacji pacjentów wymagających dalszych badań i leczenia. Badania [140] wskazują, że aplikacje mobilne mogą stanowić skuteczną alternatywę dla tradycyjnych metod diagnostycznych.

Sztuczna inteligencja (AI) zaczyna odgrywać kluczową rolę w diagnostyce skoliozy. Algorytmy sieci neuronowych wykorzystywane do analizy obrazów rentgenowskich pozwalają na bardziej precyzyjne pomiary kąta Cobb, co ma istotne znaczenie w ocenie ciężkości schorzenia. Badania [130] oraz [131] podkreślają, że analiza trójwymiarowa oraz uczenie maszynowe mogą znacząco usprawnić klasyfikację pacjentów ze skoliozą.

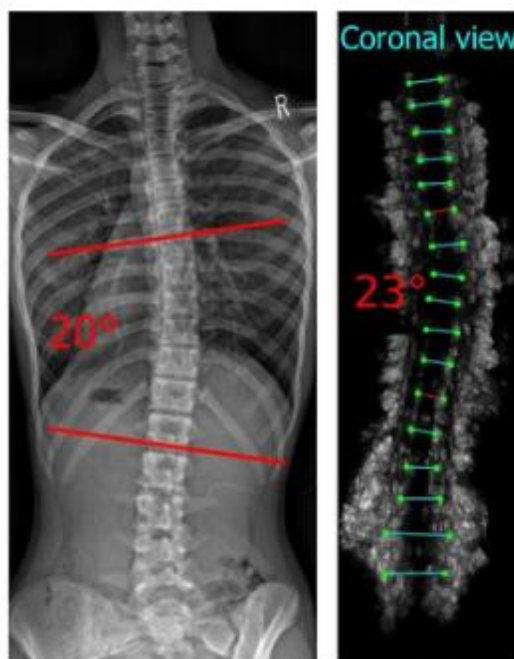
Celem pracy [130] było wykorzystanie metod uczenia maszynowego (zarówno nadzorowanego, jak i nienadzorowanego) do klasyfikacji pacjentów ze skoliozą oraz osób zdrowych na podstawie analizy nieinwazyjnej rasterstereografii. Autorzy chcieli określić, w jakim stopniu algorytmy sztucznej inteligencji mogą wspierać diagnozowanie skoliozy i odróżnianie pacjentów od osób bez deformacji kręgosłupa. Badanie opisane w [130] przeprowadzono na grupie pacjentów poddanych analizie postawy ciała za pomocą rasterstereografii – techniki obrazowania umożliwiającej ocenę geometrii powierzchni pleców bez konieczności stosowania promieniowania rentgenowskiego. Zastosowano różne metody uczenia maszynowego, uczenie nadzorowane gdzie modele trenowane były na oznaczonych danych, gdzie kategorie pacjentów były znane oraz uczenie nienadzorowane, gdzie wykorzystano algorytmy grupujące dane w klastry na podstawie ich podobieństw, bez wcześniejszego oznaczenia przypadków. Dane uzyskane z rasterstereografii obejmowały m.in. parametry asymetrii tułowia, skrzywienia kręgosłupa i rotacji. Modele oceniano pod kątem skuteczności klasyfikacji pacjentów ze skoliozą i osób zdrowych, analizując ich dokładność, czułość i specyficzność [130]. Modele uczenia nadzorowanego osiągnęły wysoką skuteczność w klasyfikacji pacjentów, co potwierdza ich potencjał diagnostyczny. Algorytmy nienadzorowane skutecznie identyfikowały naturalne grupy w danych, co sugeruje możliwość wykrywania subtelnych wzorców w deformacjach kręgosłupa bez wcześniejszego oznaczania przypadków. Badanie przeprowadzone w [130] potwierdziło, że metody uczenia maszynowego mogą wspierać klasyfikację pacjentów ze skoliozą na podstawie nieinwazyjnych badań postawy. Szczególnie obiecujące jest wykorzystanie algorytmów nienadzorowanych, które mogą pomóc w automatycznym wykrywaniu skoliozy i odróżnianiu

różnych jej typów. Zastosowanie tych technologii w diagnostyce może przyczynić się do wcześniejszego wykrywania skoliozy i poprawy skuteczności leczenia, jednocześnie ograniczając potrzebę stosowania promieniowania rentgenowskiego.

Z kolei celem pracy [131] było opracowanie metody automatycznego pomiaru kąta Cobba na podstawie zdjęć rentgenowskich kręgosłupa z wykorzystaniem sieci neuronowych spłotowych (CNN). Autorzy dążyli do stworzenia skutecznego narzędzia wspomagającego diagnostykę skoliozy, które pozwoliłoby na szybkie i precyzyjne określenie stopnia skrzywienia kręgosłupa, minimalizując błędy wynikające z manualnych pomiarów. W badaniu zastosowano konwolucyjną sieć neuronową (CNN), która została wytrenowana do automatycznego rozpoznawania i wyznaczania kąta Cobba na podstawie zdjęć rentgenowskich. Dane treningowe składały się z zestawu oznaczonych obrazów RTG, na których specjaliści medyczni ręcznie wyznaczyli kąty Cobba jako dane referencyjne. Algorytm analizował obrazy w kilku etapach, w tym wykrywanie i segmentacja kręgosłupa, automatyczna identyfikacja kręgów i wyznaczenie linii odniesienia, pomiar kąta Cobba i porównanie wyników z danymi referencyjnymi. Dokładność modelu oceniano poprzez porównanie wyników uzyskanych przez sieć neuronową z manualnymi pomiarami lekarzy. Badanie [131] potwierdziło, że zastosowanie sieci neuronowych w analizie zdjęć rentgenowskich może skutecznie wspomagać diagnostykę skoliozy, zapewniając szybkie i precyzyjne pomiary kąta Cobba. Automatyzacja tego procesu może usprawnić ocenę stopnia skrzywienia kręgosłupa, zmniejszyć obciążenie lekarzy oraz poprawić jakość opieki nad pacjentami.

Kolejne dwa najnowsze badania przedstawiają innowacyjne podejścia do automatycznego pomiaru kąta Cobba oraz analizy deformacji kręgosłupa. W badaniu [136] oceniono skuteczność automatycznego pomiaru kąta Cobba na trójwymiarowych obrazach ultrasonograficznych u dzieci z idiopatyczną skoliozą młodzieńczą, Rys.7. Badacze skupili się na walidacji i precyzji nowej technologii, porównując wyniki ultrasonograficzne z klasycznymi zdjęciami rentgenowskimi. Wyniki wykazały, że metoda ta jest dokładna i wiarygodna, co czyni ją bezpieczną alternatywą dla RTG, pozwalającą ograniczyć narażenie pacjentów na promieniowanie jonizujące. Z kolei w pracy [138] autorzy opracowali głęboki model uczenia maszynowego, który analizuje dwupłaszczyznowe obrazy rentgenowskie w celu diagnozy i oceny stopnia skoliozy. Model ten automatycznie wykrywa deformacje kręgosłupa, wyznacza kąt Cobba, a także ocenia dodatkowe parametry istotne w planowaniu leczenia. Badanie wykazało, że zastosowanie głębokich sieci neuronowych pozwala osiągnąć wysoką dokładność klasyfikacji skoliozy, zbliżoną do wyników uzyskiwanych przez doświadczonych specjalistów. Obie metody automatyzują proces diagnostyki skoliozy, zwiększając jego precyzję oraz redukując subiektywne błędy pomiarowe.

Ultrasonografia 3D stanowi bezpieczną i skuteczną alternatywę dla rentgenografii, podczas gdy modele głębokiego uczenia maszynowego mogą wspierać lekarzy w analizie skomplikowanych przypadków. Zastosowanie tych technologii w praktyce klinicznej może przyspieszyć diagnozę, zoptymalizować leczenie i poprawić opiekę nad pacjentami ze skoliozą.



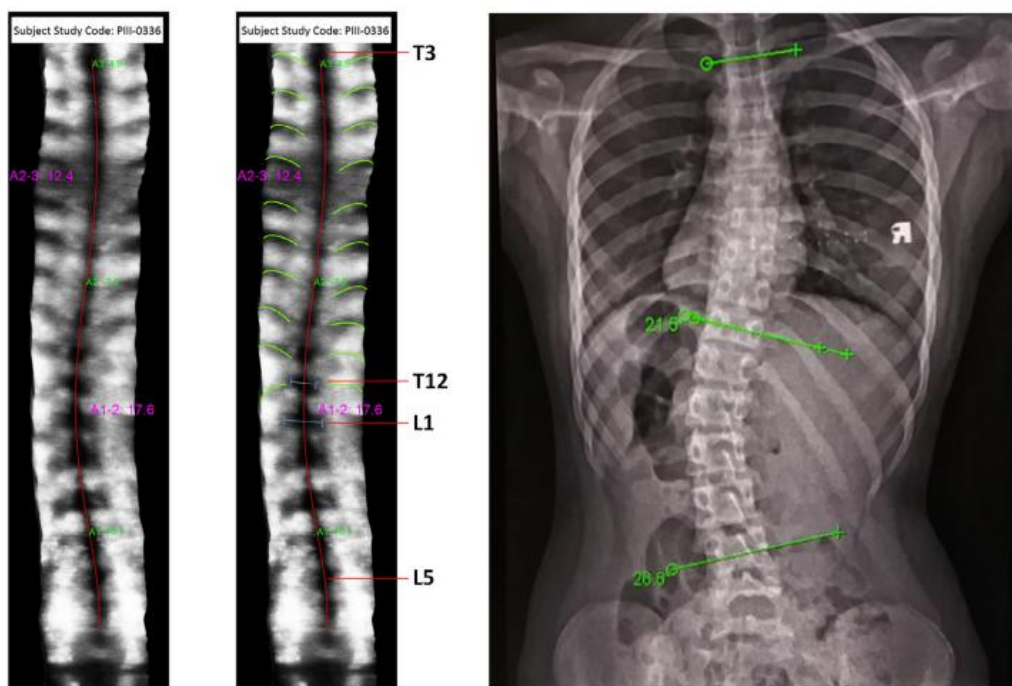
Rys. 7. Kąt Cobba mierzony na zdjęciu rentgenowskim PA; zdjęcie z lewej oraz kąt krzywizny wieńcowej mierzony na projekcji wieńcowej ultrasonografu, z zaznaczonymi środkami warstw (na zielono) i odpowiednimi parami (na czerwono); zdjęcie z prawej, źródło: [136].

Badania opisane w [135] koncentrują się na automatyzacji pomiarów i segmentacji kręgosłupa, co nie tylko zwiększa dokładność, ale także umożliwia szybsze wykrywanie nieprawidłowości, kluczowych dla wczesnej interwencji terapeutycznej. Opracowana przez autorów nienadzorowana metoda lokalizacji środka masy pozwala na automatyczną segmentację kręgosłupa na obrazach rentgenowskich oraz precyzyjne wyznaczanie kąta Cobba. Dzięki tej technologii proces diagnostyczny jest nie tylko szybszy, ale również bardziej wiarygodny, eliminując subiektywne błędy związane z manualnym pomiarem. To podejście ma ogromny potencjał w kontekście szerokiego zastosowania w praktyce klinicznej, pozwalając na skuteczną, zautomatyzowaną ocenę skoliozy i wspomagając wczesne wykrywanie deformacji kręgosłupa.

Ultrasonografia to coraz bardziej popularna metoda diagnostyczna, zyskująca na znaczeniu jako alternatywa dla tradycyjnych zdjęć rentgenowskich. Badania [133] sugerują, że może ona skutecznie zmniejszyć narażenie pacjentów na promieniowanie, co jest szczególnie istotne

w długoterminowej opiece nad pacjentami ze skoliozą. W pracy [133] opisano badanie przeprowadzone na grupie pacjentów z idiopatyczną skoliozą młodzieńczą, w którym wykorzystano ultrasonografię do pomiaru kątów deformacji. Zastosowano metodę walidacji krzyżowej, porównując wyniki uzyskane ultrasonografią z tradycyjnymi pomiarami rentgenowskimi, które są standardem w ocenie skoliozy. Analizowano również dokładność ultrasonografii w różnych stadiach skoliozy oraz jej przydatność w praktyce klinicznej. Badanie wykazało, że ultrasonografia jest wiarygodną i dokładną metodą oceny idiopatycznej skoliozy młodzieńczej (AIS), oferującą porównywalne wyniki do rentgenów, jednocześnie zapewniając korzyść w postaci bezpieczeństwa pacjentów, eliminując konieczność ekspozycji na promieniowanie jonizujące.

Jednocześnie badania [137] oraz [139] podkreślają, że dokładność pomiarów uzyskiwanych za pomocą ultrasonografii zależy od różnych czynników, takich jak ustawienie pacjenta, doświadczenie operatora oraz parametry techniczne urządzenia, co wskazuje na potrzebę dalszych badań w tej dziedzinie. Celem badania [137] było ocenienie dokładności ultrasonografii jako metody oceny deformacji kręgosłupa w idiopatycznej skoliozie (IS), porównując ją z rentgenowską metodą EOS, uznawaną za złoty standard w diagnozowaniu skoliozy, Rys.8. Badanie obejmowało 952 pacjentów i analizowało przydatność ultrasonografii w ocenie stopnia skrzywienia kręgosłupa. Wyniki wykazały, że ultrasonografia jest wiarygodną metodą oceny deformacji kręgosłupa, osiągając wyniki porównywalne z metodą EOS, która umożliwia dokładny pomiar kąta Cobba. Ultradźwięki okazały się precyzyjne i efektywne w pomiarach, a ich zaletą jest brak narażenia na promieniowanie, co stanowi istotny atut, szczególnie w przypadku dzieci i młodzieży. Badanie [139] miało na celu zidentyfikowanie czynników wpływających na dokładność pomiarów krzywizny kręgosłupa u dzieci z idiopatyczną skoliozą młodzieńczą (AIS) za pomocą ultrasonografii. Zespół badawczy analizował wpływ różnych zmiennych, takich jak ustawienie pacjenta, doświadczenie operatora oraz parametry techniczne ultrasonografu na uzyskiwane wyniki. Badanie wykazało, że dokładność ultrasonografii w pomiarach krzywizny kręgosłupa zależy od czynników takich jak technika wykonania badania, doświadczenie osoby wykonującej ultrasonografię oraz odpowiednia kalibracja urządzenia. Podkreślono również, że dla uzyskania wiarygodnych wyników istotne jest zapewnienie optymalnej pozycji pacjenta oraz prawidłowego ustawienia sondy. Mimo to wyniki badania [137] pokazują, że ultrasonografia stanowi dobrą alternatywę dla tradycyjnych metod rentgenowskich w diagnostyce skoliozy, oferując korzyści w postaci braku promieniowania, choć wymaga dalszego udoskonalenia i standaryzacji metod w celu zapewnienia maksymalnej precyzji pomiarów.



Rys. 8. Obraz projekcji objętościowej kręgosłupa z ultrasonografią pokazujący linię wyrostków kolczystych (oznaczoną czerwoną linią), za pomocą której automatycznie mierzono SPA (kąt wyrostka kolczystego), źródło: [137].

Jak widać, rozwój technologii diagnostycznych w ortopedii, szczególnie w zakresie diagnozowania skoliozy, otwiera nowe perspektywy w zakresie precyzyjnego monitorowania i leczenia tej choroby. Skoliometr Bunnella, pomimo bycia klasycznym narzędziem, wciąż pozostaje nieocenionym instrumentem w diagnostyce skoliozy dzięki swojej prostocie, dokładności oraz szerokiemu zastosowaniu w praktyce klinicznej. Wraz z rosnącą popularnością cyfrowych wersji skoliometrów oraz innych nowoczesnych narzędzi, takich jak skanowanie 3D, ultrasonografia czy aplikacje mobilne, możliwe jest uzyskanie bardziej precyzyjnych wyników, co z kolei sprzyja lepszej personalizacji leczenia. Technologie te oferują także nowe możliwości w zakresie wczesnego wykrywania skoliozy, co jest kluczowe dla efektywności terapii i zapobiegania dalszym deformacjom. Sztuczna inteligencja, wspomagająca zarówno analizę obrazów, jak i pomiarów, może dodatkowo przyczynić się do optymalizacji diagnostyki, zmniejszając ryzyko błędów ludzkich oraz przyspieszając proces oceny stanu pacjenta. Z pewnością w przyszłości to połączenie tradycyjnych metod z nowoczesnymi technologiami pozwoli na jeszcze skuteczniejszą walkę z tą trudną do zdiagnozowania chorobą, a także na poprawę jakości życia pacjentów.

W kontekście nowoczesnych narzędzi diagnostycznych, istotnym krokiem w rozwoju technologii pomiarów postawy ciała jest wprowadzenie modelu badania postawy AFA-B, który pozwala na bardziej kompleksową ocenę w ramach ortopedycznej diagnostyki skoliozy.

W kolejnej części pracy przedstawiona zostanie analiza tego modelu oraz zastosowanie ortometru w monitorowaniu postawy ciała pacjentów.

2.4 Model badania postawy ciała AFAB z wykorzystaniem ortometru

Postawa ciała dzieci w wieku szkolnym kształtuje się pod wpływem zarówno czynników genetycznych, jak i licznych elementów środowiskowych. Kluczowe znaczenie mają m.in. stan zdrowia noworodka tuż po urodzeniu, poziom opieki zdrowotnej oraz warunki socjalno-społeczne we wczesnym dzieciństwie, obejmujące okres przedszkolny [142][143][144].

Na przestrzeni ostatnich trzech dekad, w związku ze wzrostem siedzącego trybu życia wśród dzieci i młodzieży, odnotowano istotne pogorszenie jakości postawy ciała. Badania wskazują, że wady postawy występują u 30-60% populacji dziecięcej, przy czym około 17% stanowią deformacje kręgosłupa, a 45-55% to nieprawidłowości dotyczące klatki piersiowej, miednicy oraz kończyn dolnych i górnych [145]. Ocena postawy dziecka, dokonywana w ramach okresowych bilansów zdrowia przez pediatrów oraz pielęgniarki szkolne, przez długi czas bazowała głównie na obserwacji wzrokowej. Oceniano symetrię ciała w pozycji stojącej, uwzględniając poziom barków, kąty łopatek oraz krzywizny kręgosłupa w płaszczyźnie przednio-tylnej, często bez wykorzystania specjalistycznych narzędzi pomiarowych [146][147]. Jednakże, duży wpływ doświadczenia osoby przeprowadzającej badanie sprawiał, że dochodziło zarówno do błędów w nierozpoznananiu wad postawy, w tym skoliozy idiopatycznej (SI), jak i do przypadków nadrozpoznanalności tych schorzeń [147][148][149][150].

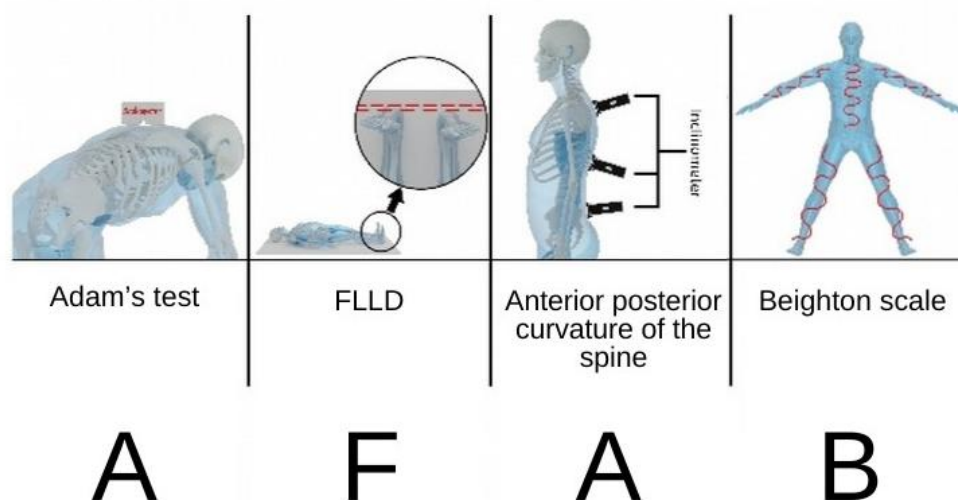
W latach 80. XX wieku w wielu krajach wprowadzono standardowe metody oceny postawy ciała, uwzględniające diagnostykę skoliozy idiopatycznej za pomocą testu Adamsa i skoliometru Bunnella [103][151][152]. Choć skoliometr pozwala na ocenę asymetrii grzbietu, to nie umożliwia pomiaru innych istotnych parametrów postawy, takich jak bilans strzałkowy kręgosłupa, który jest coraz częściej brany pod uwagę w kontekście rozwoju SI [153][154][155].

Kolejnym czynnikiem analizowanym w badaniach nad skoliozą idiopatyczną jest asymetria miednicy. Rola budowy miednicy w procesie powstawania deformacji kręgosłupa pozostaje przedmiotem licznych dyskusji naukowych [156]. W ramach badania można ocenić długość funkcjonalną kończyn dolnych (FLL), co może dostarczyć informacji dotyczących ewentualnych nieprawidłowości miednicy [157][158][159].

Dodatkowo, w literaturze naukowej podkreśla się znaczenie elastyczności kręgosłupa oraz nadmiernej ruchomości stawów (HJM) jako możliwych czynników predysponujących do deformacji postawy. Obecnie do oceny hipermobilności stawów stosuje się test Beightona [158][160].

Na podstawie omówionych aspektów został opracowany algorytm oceny ryzyka rozwoju skoliozy, uwzględniający kluczowe parametry diagnostyczne. Algorytm ten otrzymał nazwę AFAB, będącą akronimem od pierwszych liter analizowanych wskaźników:

- **A** – kąt rotacji tułowia (*Angle of Trunk Rotation, ATR*),
- **F** – funkcjonalna długość kończyn dolnych (*Functional Leg Length, FLL*),
- **A** – krzywizna kręgosłupa w płaszczyźnie strzałkowej (*Anterior Posterior Curvature of Spine*),
- **B** – skala oceny hipermobilności stawów – skala Beighton, (*Beighton Score*).



Rys. 9. Parametry postawy ciała badane w algorytmie AFAB.

Model AFAB: Kompleksowa Analiza Postawy Ciała

Zastosowanie zaawansowanych narzędzi diagnostycznych jest podstawą współczesnej analizy postawy ciała. Model badania postawy ciała AFAB jest przykładem kompleksowego podejścia do oceny postawy, które łączy różne metody oceny, w tym skanowanie 3D, technologie ultrasonograficzne oraz aplikacje mobilne. Model AFAB nie tylko umożliwia pomiar kątów i kształtu krzywizn kręgosłupa, ale także pozwala na monitorowanie dynamicznych zmian postawy w odpowiedzi na zmiany stylu życia, rehabilitację czy leczenie ortopedyczne.

Badanie AFAB zapewnia szczegółowe informacje o równowadze postawy, ustawieniu ciała oraz wykrywaniu ewentualnych nieprawidłowości, które mogą prowadzić do problemów zdrowotnych. Dzięki integracji nowoczesnych technologii, model AFAB pozwala na szybkie,

dokładne i powtarzalne wyniki, co czyni go niezwykle przydatnym narzędziem w diagnostyce, jak również w monitorowaniu terapii ortopedycznych i rehabilitacyjnych.

Integracja nowoczesnych narzędzi diagnostycznych, takich jak skala Beightona, Ortometr oraz model AFAB, pozwala na stworzenie bardziej kompleksowego podejścia do oceny postawy ciała, szczególnie w kontekście wczesnej diagnostyki skoliozy u dzieci. Zastosowanie tych narzędzi w praktyce klinicznej umożliwia precyzyjne monitorowanie zmian w postawie, a także dostarcza istotnych informacji dotyczących elastyczności stawów i rozwoju skoliozy. Nowoczesne technologie diagnostyczne stanowią zatem kluczowy element w efektywnej diagnostyce i leczeniu skoliozy w młodszym wieku.

Na potrzeby wykonania testu AFAB opracowano elektroniczny przyrząd Ortometr, który łączy w sobie funkcje skoliometru Bunnella oraz inklinometru Saunders'a (pochyłomierz do pomiaru zakresu ruchu stawów). Urządzenie to zostało opisane w rozdziale 5.

2.4.1 Pomiar ATR w teście Adamsa

Pomiar ATR (kąta rotacji tułowia) w teście Adamsa, jest obecnie kluczowym, swoistym parametrem wskazującym na obecność skoliozy u dziecka [161]. Podczas badania pacjent staje prosto, a następnie wykonuje powolny skłon tułowia do przodu przy wyprostowanych kolanach i swobodnie zwisających ramionach. Badanie pozwala na ocenę asymetrii tułowia oraz obecności garbu żebrowego lub wału lędźwiowego, które mogą wskazywać na skoliozę strukturalną.

Przyjmuje się następującą interpretację wyników: ATR- $0-3^{\circ}$ asymetria fizjologiczna, ATR- $4-6^{\circ}$ tzw. strefa niepewna wymagająca kontroli dziecka w okresie 3-6 miesięcy oraz ATR $\geq 7^{\circ}$ ryzyko wystąpienia skoliozy idiopatycznej i zalecenie skierowania dziecka na diagnostykę radiologiczną [161]. Jeśli kąt rotacji tułowia przekracza określoną wartość (zazwyczaj $5-7$ stopni), wskazane może być skierowanie pacjenta na dalsze badania obrazowe, np. RTG kręgosłupa, w celu dokładniejszej oceny skoliozy i jej progresji.

Test Adamsa wykonywany z użyciem ortometru jest nieinwazyjny, szybki i łatwy do wykonania, a ponadto cechuje się wysokim poziomem rzetelności tj. wysoką czułością i swoistością. Szczegółowa procedura postępowania podczas wykonywania testu Adamsa z wykorzystaniem ortometru i aplikacji ORT została opisana w rozdziale 5.

2.4.2 Pomiary kątowe obręczy kończyn dolnych

Pomiary kątowe obręczy kończyn dolnych są kluczowym elementem oceny funkcjonalnej narządu ruchu, szczególnie w diagnostyce ortopedycznej, neurologicznej oraz w rehabilitacji.

Pozwalają one na precyzyjne określenie zakresu ruchomości w stawach biodrowych, kolanowych oraz skokowo-goleniowych, co jest istotne zarówno w ocenie stanu pacjenta, jak i monitorowaniu postępów terapii.

W badaniu wykorzystywane są specjalistyczne narzędzia, takie jak ortometr, które umożliwiają dokładne pomiary kątowe w różnych płaszczyznach. Procedura obejmuje analizę ruchów zgięcia, wyprostu, odwodzenia, przywodzenia oraz rotacji, co pozwala na kompleksową ocenę biomechaniki kończyn dolnych.

Szczególną uwagę poświęca się badaniu stóp, które odgrywają istotną rolę w teście AFAB. Test ten uwzględnia m.in. kąt rotacji tułowia (ATR), funkcjonalną długość kończyn dolnych (FLL), krzywiznę kręgosłupa w płaszczyźnie strzałkowej oraz hipermobilność stawów według skali Beighton. Dzięki temu możliwe jest dokładne określenie wpływu biomechaniki kończyn dolnych na postawę ciała i funkcjonowanie całego układu ruchu.

Dokładna analiza kątowa kończyn dolnych pozwala na ocenę funkcjonalności stawów, a tym samym wykrycie ewentualnych nieprawidłowości biomechanicznych. Z wykorzystaniem ortometru możliwe jest badanie zakresu ruchomości zarówno stawu biodrowego, kolanowego, jak i skokowo-goleniowego. Jednak w teście AFAB szczególną uwagę poświęca się stawowi skokowo-goleniowemu, a zwłaszcza pomiarowi długości stopy, który ma istotne znaczenie dla oceny biomechaniki kończyn dolnych oraz wpływu na postawę ciała. Szczegółowy opis wykonywania pomiarów z wykorzystaniem Ortometru i aplikacji ORT został przedstawiony w rozdziale Metoda automatycznej analizy asymetrii grzbietu oraz krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa.

2.4.3 Ocena krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa w płaszczyźnie strzałkowej

Ocena krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa, w tym lordozy lędźwiowej oraz kifozy piersiowej, jest kluczowym elementem w diagnozowaniu zaburzeń posturalnych, takich jak skolioza, hiperlordoza, hipokifoza czy inne patologie, które mogą prowadzić do problemów zdrowotnych, w tym bólów pleców.

Scenariusz postępowania podczas oceny postawy obejmuje precyzyjne kroki przygotowania urządzenia ortometr, ustawienia pacjenta oraz wykonania pomiarów na różnych poziomach kręgosłupa. Działania te są realizowane za pomocą zaawansowanego sprzętu, który umożliwia dokładne zmierzenie kątów krzywizn, co jest niezbędne do dalszej analizy postawy ciała i podejmowania odpowiednich działań terapeutycznych. W rozdziale tym przedstawiono krok po kroku cały proces oceny, począwszy od uruchomienia urządzenia, przez pomiar

nachylenia miednicy, lordozy lędźwiowej oraz kifozy piersiowej, aż po obliczenie łącznej wartości kifozy piersiowej.

2.4.4 Skala Beighton’a wiotkości stawowej

Skala Beighton’a to 9-punktowa skala wykorzystywana do oceny stopnia wiotkości stawowej, która odgrywa kluczową rolę w diagnostyce skoliozy, szczególnie u dzieci. Z uwagi na wpływ wiotkości stawowej na rozwój skoliozy, jej zastosowanie w diagnostyce skoliozy u dzieci i młodzieży jest zasadne. Wiotkość stawowa, mierzona przy pomocy tej skali, może stanowić jedno z kryteriów oceny ryzyka wystąpienia skoliozy, dlatego też skala Beighton’a znalazła zastosowanie w algorytmach diagnostycznych oceny postawy ciała.

2.5 Metody regresji i miary oceny jakości modeli predykcyjnych

Regresja stanowi jedną z najważniejszych metod analizy ilościowej w naukach technicznych. Jej podstawowym celem jest opisanie zależności pomiędzy zmienną zależną (objaśnianą) a jedną lub wieloma zmiennymi niezależnymi (objaśniającymi). Współcześnie metody regresyjne znajdują zastosowanie nie tylko w klasycznej statystyce, lecz także w zaawansowanych technikach uczenia maszynowego, takich jak sieci neuronowe, lasy losowe czy algorytmy sąsiedztwa.

W ujęciu praktycznym, analiza regresyjna pełni podwójną rolę – umożliwia zarówno modelowanie badanych zjawisk, jak i ocenę jakości uzyskanych modeli. Każdy model, niezależnie od swojej złożoności, musi zostać zweryfikowany pod kątem trafności i wiarygodności wyników. W tym celu stosuje się zestaw miar statystycznych, które opisują strukturę danych wejściowych oraz dokładność predykcji modelu. Dlatego też, zanim omówione zostaną poszczególne typy modeli regresyjnych wykorzystywanych w niniejszej pracy, w kolejnej części przedstawiono podstawowe miary statystyczne wykorzystywane zarówno do charakterystyki danych, jak i do oceny jakości dopasowania modeli regresyjnych.

2.5.1 Miary statystyczne opisujące dane i modele regresji

Miary statystyczne stanowią podstawę analizy opisowej i ilościowej. Umożliwiają one syntetyczne przedstawienie struktury danych oraz ocenę jakości modeli predykcyjnych [162][163], [164], [165].

2.5.1.1 Liczba próbek (samples)

Liczba próbek określa liczbę obserwacji wykorzystanych do analizy. Wielkość próby wpływa na wiarygodność wyników, dokładność estymacji oraz stabilność uzyskanych parametrów.

2.5.1.2 Średnia arytmetyczna (mean_val)

Średnia arytmetyczna jest najczęściej stosowaną miarą tendencji centralnej, informującą o przeciętnym poziomie badanej cechy. Jest to suma wszystkich wartości w zbiorze danych podzielona przez ich liczbę:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5)$$

Średnia reprezentuje wartość typową dla całego zbioru, jednak jej interpretacja może być zaburzona przez wartości skrajne.

2.5.1.3 Mediana (median_val)

Mediana jest wartością środkową uporządkowanego zbioru danych. Dzieli próbę na dwie równe części – połowa obserwacji przyjmuje wartości mniejsze lub równe medianie, a połowa większe. Jest odporna na wartości odstające, co czyni ją użyteczną w przypadku rozkładów asymetrycznych.

Wzór na medianę zależy od tego, czy liczba obserwacji n jest nieparzysta, czy parzysta:

- Dla nieparzystej liczby obserwacji n :

$$mediana = x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)} \quad (6)$$

czyli mediana to wartość znajdująca się na pozycji $\left(\frac{n+1}{2}\right)$ w uporządkowanym zbiorze.

- Dla parzystej liczby obserwacji n :

$$mediana = \frac{x_{\left(\frac{n}{2}\right)} + x_{\left(\frac{n}{2}+1\right)}}{2} \quad (7)$$

2.5.1.4 Odchylenie standardowe (std_val)

Odchylenie standardowe opisuje przeciętne odchylenie wartości zmiennej od jej średniej. Wzór ma postać:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2} \quad (8)$$

Gdzie: $\bar{X}$ = średnia arytmetyczna

Znak „+” przed pierwiastkami informuje o właściwości odchylenia standardowego.

Odchylenie standardowe zawsze przyjmuje wartości większe lub równe 0. Przy czym wartość zero przyjmuje tylko wtedy gdy wszystkie obserwacje mają taką samą wartość. Wartość odchylenia standardowego informuje o stopniu zróżnicowania danych – im większe, tym bardziej rozproszone są obserwacje wokół średniej.

2.5.1.5 Wartości skrajne i rozstęp (*max_val*, *min_val*, *range_val*)

Wartości maksymalna i minimalna określają odpowiednio najwyższą i najniższą wartość zmiennej w zbiorze danych. Różnica między nimi stanowi rozstęp:

$$\text{rozstęp} = \text{wartość maksymalna} - \text{wartość minimalna} \quad (9)$$

Miary te są wrażliwe na obserwacje odstające, dlatego często uzupełnia się je o inne wskaźniki zmienności, np. kwartyle czy odchylenie standardowe.

2.5.1.6 Miary błędu modelu (*ME*, *MAE*, *RMSE*)

Jakość dopasowania modelu regresyjnego ocenia się za pomocą miar błędu, które określają różnice między wartościami przewidywanymi a rzeczywistymi:

- Średni błąd (*ME*):

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad (10)$$

Wskaźnik ten uwzględnia znak błędu i pozwala ocenić kierunek tendencji modelu (zawyżanie lub zaniżanie prognoz).

- Średni błąd bezwzględny (*MAE*):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (11)$$

Miara odporna na znoszenie się błędów dodatnich i ujemnych, określająca przeciętną wielkość błędu niezależnie od jego kierunku.

- Pierwiastek błędu średniokwadratowego (*RMSE*):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (12)$$

RMSE oblicza pierwiastek kwadratowy ze średniej arytmetycznej kwadratów błędów między wartościami rzeczywistymi a przewidywanymi. Jest bardziej czuły na wartości odstające.

2.5.1.7 Wariancja (Variance)

Wariancja określa stopień rozproszenia danych wokół średniej. Pokazuje, jak bardzo dane różnią się od średniej, czyli czy są skupione blisko niej, czy mocno rozproszone. Wariancja nie ma interpretacji statystycznej i jest wykorzystywana do budowy innych parametrów tj.: momentów centralnych, odchylenia standardowego. Zależnie od szeregu statystycznego wariancję oblicza się na podstawie wzorów:

- szereg prosty (szczegółowy):

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N} \quad (13)$$

- szereg rozdzielczy jednopunktowy:

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2 n_i}{N} \quad (14)$$

- szereg rozdzielczy z przedziałami klasowymi:

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (\dot{x}_i - \bar{x})^2 n_i}{N} \quad (15)$$

Gdzie,

x_i - warianty cechy mierzalnej X,

$\dot{x}_i$ - środek przedziału klasowego,

$\bar{x}$ - średnia arytmetyczna,

n_i - wagi (liczebności cząstkowe) odpowiadające poszczególnym wariantom zmiennej X,

N - liczebność całej zbiorowości statystycznej.

2.5.1.8 Współczynnik determinacji (R^2 i RD^2 skorygowany)

Współczynnik determinacji R^2 określa, w jakim stopniu zmienność zmiennej zależnej została wyjaśniona przez model regresyjny:

$$R^2 = 1 - \varphi^2 \quad (16)$$

Gdzie,

φ^2 - współczynnik zbieżności

Skorygowany współczynnik determinacji (RD^2) uwzględnia liczbę zmiennych niezależnych oraz wielkość próby, co pozwala uniknąć przeszacowania jakości dopasowania w modelach z wieloma predyktorami.

2.5.2 Modele regresji stosowane w kalibracji pomiaru

Kalibracja polega na określaniu relacji między sygnałem pomiarowym a wartością wzorcową. W tym celu stosuje się modele regresji pozwalające odwzorować funkcję estymacyjną pomiaru. Omówione metody regresji stanowią podstawowy zestaw narzędzi zastosowanych w niniejszej pracy doktorskiej. W praktyce badawczej właściwy dobór metody zależy od charakteru danych, oczekiwanej dokładności modelu oraz dostępnych zasobów obliczeniowych. Klasyczne metody, takie jak regresja liniowa i wielomianowa, pozwalają na interpretowalne modele, natomiast techniki oparte na uczeniu maszynowym – jak sieci neuronowe, lasy losowe i KNN – oferują większą elastyczność w odwzorowaniu złożonych relacji między zmiennymi.

2.5.2.1 Regresja liniowa

Regresja liniowa to metoda statystyczna służąca do modelowania i analizy zależności między zmienną zależną a jedną (regresja prosta) lub wieloma zmiennymi niezależnymi (regresja wieloraka). Zakłada ona istnienie liniowej relacji pomiędzy zmiennymi, co oznacza, że zmiany wartości zmiennej niezależnej powodują proporcjonalne zmiany wartości zmiennej zależnej [162],[166]. Model regresji liniowej ma postać:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (17)$$

Gdzie,

x - zmienna zależna,

y - zmienna niezależna,

β_0 - wyraz wolny (punkt przecięcia z osią y),

β_1 - współczynnik kierunkowy (nachylenie prostej),

ε - składnik losowy (błąd modelu).

Celem regresji liniowej jest dopasowanie prostej (lub hiperpłaszczyzny w przypadku wielu zmiennych) tak, aby jak najlepiej przewidywała wartość zmiennej zależnej na podstawie znanych wartości zmiennych niezależnych. Współczynniki modelu są najczęściej estymowane metodą najmniejszych kwadratów.

2.5.2.2 Regresja wielomianowa

Regresja wielomianowa to rozszerzenie regresji liniowej, które umożliwia modelowanie nieliniowych zależności pomiędzy zmienną zależną a zmiennymi niezależnymi poprzez

wprowadzenie potęg (wyższych rzędów) zmiennych objaśniających [163][166]. Model ten przyjmuje postać:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 + \dots + \beta_n x^n + \varepsilon \quad (18)$$

Gdzie,

x - zmienna zależna,

y - zmienna niezależna,

$\beta_0 \dots \beta_n$ - współczynniki modelu,

n - rząd (stopień) wielomianu,

ε - składnik losowy (błąd modelu).

Regresja wielomianowa umożliwia uchwycenie krzywoliniowych trendów w danych, zachowując przy tym liniowość względem parametrów (czyli współczynników β). Choć model zawiera potęgi zmiennych, to estymacja współczynników nadal odbywa się metodą najmniejszych kwadratów, jak w klasycznej regresji liniowej. Model ten znajduje zastosowanie wszędzie tam, gdzie dane nie układają się w prostą linię, lecz wykazują np. kształt paraboliczny lub bardziej złożony.

2.5.2.3 Sieci neuronowe z algorytmem Levenberga–Marquardta (LM)

Sieci neuronowe trenowane algorytmem Levenberga-Marquardta (LM) stanowią jedno z najefektywniejszych podejść do uczenia nadzorowanego, szczególnie w przypadku zadań regresji oraz aproksymacji funkcji. Algorytm LM jest modyfikacją metody Newtona, przeznaczoną do minimalizacji funkcji błędu średniokwadratowego. Łączy on zalety metody największego spadku (gradientowej) i metody Newtona, zapewniając zarówno stabilność, jak i szybką zbieżność [167].

W kontekście sztucznych sieci neuronowych, algorytm LM jest często wykorzystywany do trenowania klasycznych sieci wielowarstwowych typu MLP (Multilayer Perceptron). Dzięki wykorzystaniu drugiej pochodnej (przybliżonej przez macierz Jacobiego), algorytm pozwala na bardziej precyzyjne aktualizowanie wag, co skutkuje szybszym osiągnięciem minimum funkcji błędu w porównaniu do prostych metod gradientowych [168].

Jednym z głównych atutów LM jest bardzo dobra efektywność przy umiarkowanych rozmiarach zbioru danych, co czyni go popularnym narzędziem w zastosowaniach inżynierskich, takich jak analiza sygnałów, sterowanie, diagnostyka czy kalibracja systemów pomiarowych. W środowisku MATLAB algorytm LM jest domyślnym rozwiązaniem w funkcji *trainlm*, umożliwiającą szybkie trenowanie sieci neuronowych [169].

2.5.2.4 Multilayer Perceptron (MLP) i algorytm Adam

Multilayer Perceptron (MLP) jest klasyczną architekturą sieci neuronowej, złożoną z warstwy wejściowej, jednej lub więcej warstw ukrytych oraz warstwy wyjściowej. Umożliwia modelowanie nieliniowych zależności między zmiennymi [170]. W procesie uczenia MLP szeroko stosowany jest algorytm Adam (Adaptive Moment Estimation), który łączy zalety metod AdaGrad i RMSProp. Adam wykorzystuje estymacje pierwszego (średnia gradientu) i drugiego momentu (wariancja gradientu), co pozwala adaptacyjnie dostosowywać tempo uczenia dla każdego parametru [171]. W porównaniu do algorytmu Levenberga – Marquardta, Adam lepiej skaluje się dla dużych zbiorów danych i złożonych architektur sieci, jednak może wolniej osiągać minimum funkcji błędu [172].

2.5.2.5 Random Forest (RF)

Random Forest to metoda zespołowa (*ensemble learning*), opierająca się na zestawie niezależnych drzew decyzyjnych. Każde drzewo jest trenowane na losowej próbce danych, a końcowa prognoza powstaje przez uśrednienie wyników (dla regresji) lub głosowanie większościowe (dla klasyfikacji). Model RF charakteryzuje się wysoką odpornością na przeuczenie oraz zdolnością do modelowania złożonych, nieliniowych relacji między zmiennymi [173] [174].

2.5.2.6 K-Nearest Neighbors (KNN)

Algorytm k -najbliższych sąsiadów (KNN) przypisuje nowej obserwacji wartość zmiennej zależnej na podstawie średniej z wartości k najbliższych punktów w przestrzeni atrybutów. W przypadku klasyfikacji – przypisywana jest najczęstsza klasa sąsiadów [175][176]. KNN nie wymaga procesu uczenia, jednak jego efektywność zależy od właściwego doboru liczby sąsiadów oraz metryki odległości. Algorytm ten znajduje szerokie zastosowanie w analizie danych diagnostycznych, klasyfikacji obiektów i systemach wspomagania decyzji.

3 ZASTOSOWANIE METOD REGRESJI DLA ZWIĘKSZENIA DOKŁADNOŚCI POMIARÓW Z ORTOMETRU

W modelu badania postawy ciała AFAB wykorzystywane jest elektroniczne urządzenie ortometr. Podstawowym parametrem mierzonym w teście Adamsa jest kąt rotacji tułowia na odcinku kręgosłupa od C7 do S1 (rozdział 2.4.1). Pomiar kąta stosowany jest także podczas oceny krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa w płaszczyźnie strzałkowej (rozdział 2.4.3).

W niniejszym rozdziale pokazano przebieg oraz wyniki badań przeprowadzonych na trzech stanowiskach badawczych:

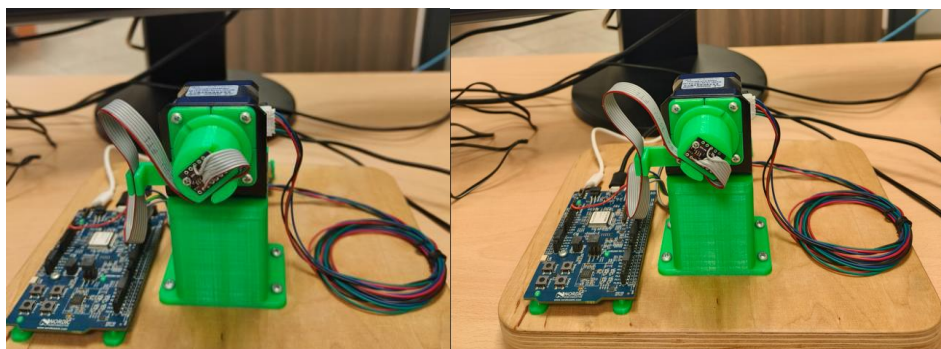
- stanowisku obrotowym układu akcelerometru,
- stanowisku obrotowym ortometru,
- stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji.

Badania miały na celu wykorzystanie znanych metod regresji oraz opracowanie metod zwiększających dokładność pomiarów kąta na bazie wskazań z akcelerometru i żyroskopu dla urządzenia ortometr. W ramach przeprowadzonych badań do estymacji pomiarów zastosowano metody regresji wielomianowych i uczenia maszynowego. Badania pozwoliły dodatkowo na poprawę zastosowanego w ortometrze pomiaru długości.

Rozdział zawiera także opis konstrukcji stanowisk badawczych wraz z oprogramowaniem sterującym i akwizycji danych pomiarowych.

3.1 Badania na testowym stanowisku pomiaru kąta

W celu uzyskania jak najdokładniejszej wartości mierzonego kąta zaprojektowano i skonstruowano stanowisko pomiarowe składające się z elementu ruchomego poruszanego za pomocą silnika krokowego sterowanego kontrolerem. Elementy montażowe oraz ramię obrotowe wydrukowano na drukarce 3D. Na obrotowym ramieniu zamontowano zastosowany w ortometrze układ elektroniczny wykonany w technologii MEMS.



Rys. 10. Stanowisko obrotowe pomiaru kąta (w różnych fazach cyklu)

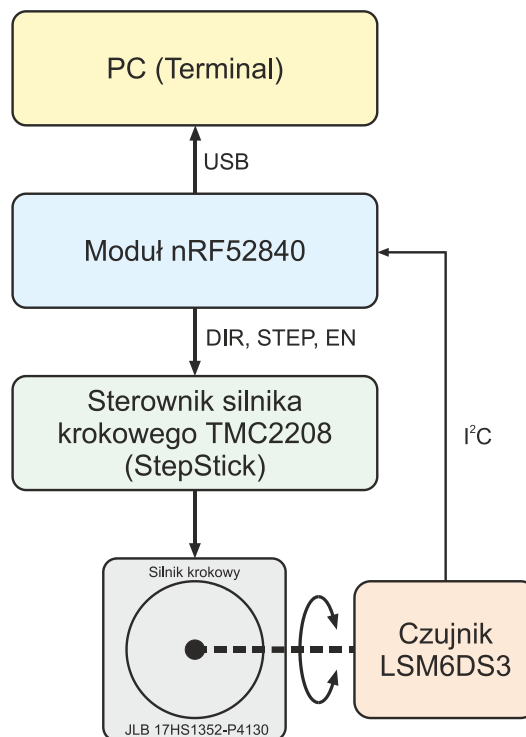
Układy MEMS są obecnie niezastąpionym elementem wielu rozwiązań technicznych, od zliczenia kroków, poprzez wykrywanie orientacji ekranu w smartfonie, po elementy ratujące życie w układach sterujących poduszką powietrzną w samochodzie. Za ich pomocą realizowane są czujniki przyspieszeń liniowych, kątowych, pola magnetycznego czy też czujniki drgań akustycznych (mikrofony). Jednym z zastosowań układów MEMS jest inklinometr, czyli czujnik przechyłu, mierzący relacje kątową elementu pomiarowego do wektora grawitacyjnego Ziemi [179].

Podstawą sprzętową inklinometru zastosowanego w ortometrze, jak i stanowisku testowym jest układ MEMS firmy STMicroelectronics o symbolu LSM6DS3, który w swojej strukturze zawiera 3-osiowy akcelerometr wraz z 3-osiowym żyroskopem [180]. Dane z elementów pomiarowych odczytywane są w postaci 16-bitowej. W badanych zastosowaniach założono docelową częstotliwość próbkowania na 104Hz.

Stanowisko to pozwala na ocenę wskazań akcelerometru oraz żyroskopu, a przede wszystkim wyników zastosowania różnych algorytmów wyznaczania kąta obrotu w oparciu o dane zebrane z tych czujników oraz porównania ich z wzorcowym kątem wynikającym z obrotu silnika krokowego.

Moduł kontrolera sterownika oparty o mikrokontroler Nordic Semiconductors nRF52840 został oprogramowany w środowisku SEGGER Embedded Studio for ARM 5.64. Oprogramowanie steruje pracą silnika krokowego, definiuje parametry cykli (stopień wychylenia i prędkość obrotową) a także na odczyt wartości pomiarowych z czujników oraz ich transmisję do komputera PC.

Zastosowany silnik krokowy o 200 krokach na obrót ($1,8^\circ$), przy ustawieniu jego sterownika na 16 mikrokroków pozwala uzyskać rozdzielczość kątową 3200 kroków na 360° .



Rys. 11. Schemat stanowiska obrotowego pomiaru kąta wychylenia

Stanowisko to posłużyło do wyznaczania za pomocą zaawansowanych metod numerycznych w tym regresji liniowej oraz regresji wielomianowej funkcji wprowadzających poprawkę do pomiaru kąta i znacznego zmniejszenia błędów pomiarowych, które wynikały z różnych prędkości obrotowych. Opracowana została metoda kalibracji danych pomiarowych z inklinometru, poprzez zastosowanie aproksymacji wielomianowej. Metoda ta pozwoliła na wyznaczenie wartości wielomianów dla funkcji przybliżenia wartości skalibrowanych, dla ruchu ortometru w prawo i w lewo, z uwzględnieniem różnych prędkości kątowych.

3.1.1 Przebieg badań

Zaprogramowano kontroler silnika krokowego, tak by pozwalał na przeprowadzenie badania jedną z następujących prędkości kątowych:

Nr	Okres kroku silnika krokowego [μs]	Prędkość kątowa [°/s]	Id zbioru danych
1.	128000	0,88	11*
2.	64000	1,76	12
3.	32000	3,52	13
4.	16000	7,031	14
5.	8000	14,06	15
6.	4000	28,12	16

Nr	Okres kroku silnika krokowego [μ s]	Prędkość kątowna [$^{\circ}$ /s]	Id zbioru danych
7.	3000	37,50	17
8.	2000	56,25	18
9.	1000	112,50	19
10.	500	225,00	20
* - nazwa pliku ze zbiorem danych speed_[id]_[n]_cycles.xlsx – n liczba cykli			

Tabela 2. Prędkości kątowne obrotowego stanowiska pomiarowego

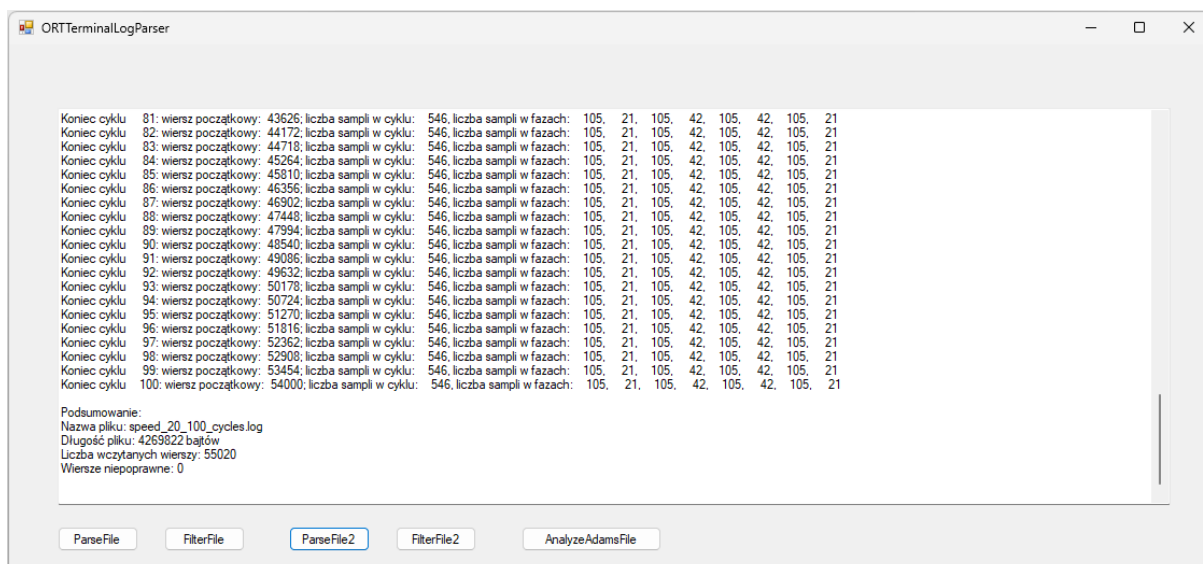
Oprogramowano także przyciski kontrolera, które pozwalały na wybór prędkości oraz rozpoczęcie i zakończenie badania.

Przeprowadzono serię eksperymentów dla różnych prędkości obrotowych, po kilkadziesiąt cykli dla każdej prędkości.

Dane pomiarowe odbierane były po łączu szeregowym FDDI przez aplikację terminala, które następnie zapisywane były do plików w formacie ASCII. Zapisywane dane obejmowały:

- moment czasowy odbioru danych – *Time [hh:mm:ss.ms]*,
- kąt wzorcowy wynikający z pozycji silnika krokowego - *Step [^]*,
- kąt wyznaczony przez oprogramowanie wbudowane w oparciu o dane z akcelerometru – *ACCAngle [^]*,
- wartości chwilowego przyspieszenia w osiach x, y, z - *Acc_x [g]*, *Acc_y [g]*, *Acc_z [g]*,
- wartość chwilowej prędkości kątowej z żyroskopu w osiach x, y, z - *Gyr_x [mdps]*, *Gyr_y [mdps]*, *Gyr_z [mdps]*,
- zmienna logiczna określająca czy silnik znajduje się w ruchu – *Moving*.

Zebrane podczas badań pliki pomiarów przetworzono oprogramowaniem stworzonym w ramach projektu doktorskiego, weryfikującym poprawność danych pomiarowych, określającym liczbę próbek przypadających na cykl i jego poszczególne fazy oraz umożliwiającym filtrację faz tak, by zapewnić identyczną liczbę próbek przypadających na poszczególne fazy cyklu.



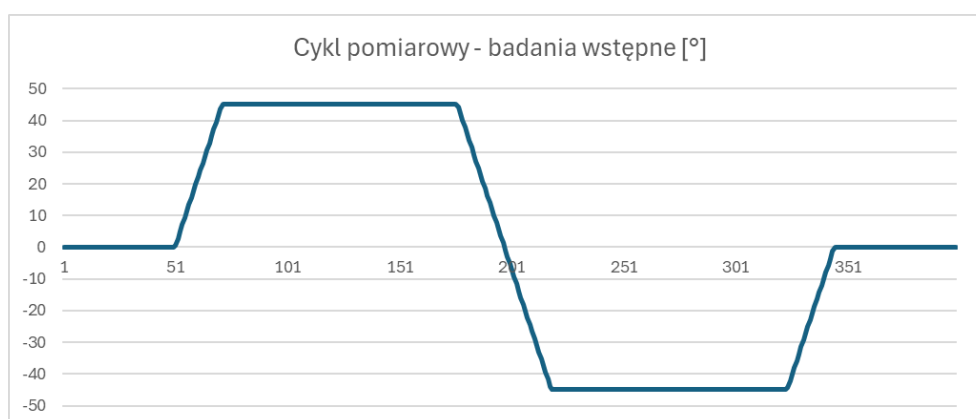
Rys. 12. Okno aplikacji narzędziowej do weryfikacji i filtracji plików z danymi pomiarowymi

3.2 Badania regresji na bazie pomiarów kąta wyznaczonego na podstawie akcelerometru

Po przygotowaniu wszystkich elementów stanowiska badawczego przystąpiono do badań wskazań akcelerometru i wyznaczonego na ich podstawie kąta w porównaniu do wzorcowego kąta obrotu silnika krokowego. Poniżej przedstawiono przebieg i wyniki tych prac.

3.2.1 Badanie wstępne – regresja liniowa

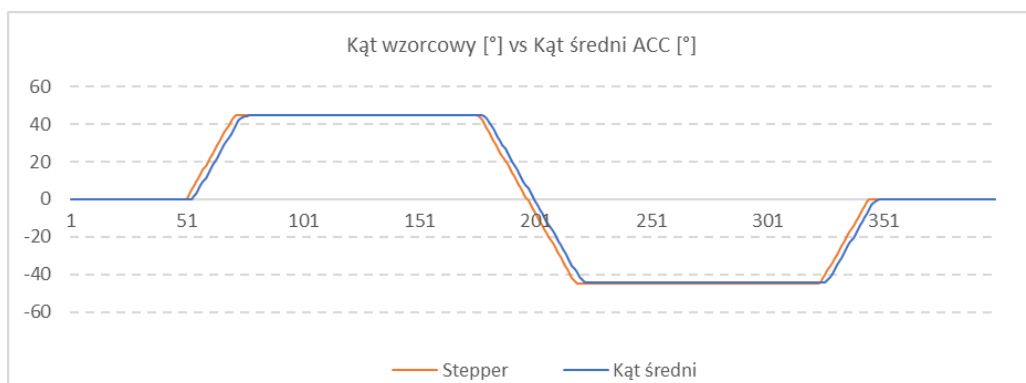
W badaniach wstępnych kontroler silnika krokowego zaprogramowany został tak, by w jednym cyklu wykonywał obroty od 0° do 45° , od 45° do -45° oraz od -45° do 0° , jak na poniższym wykresie:



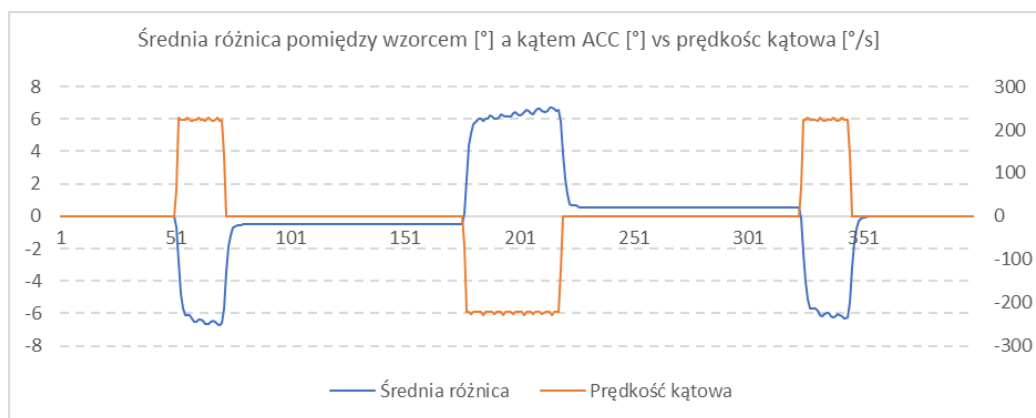
Rys. 13. Wykres wychyleń silnika krokowego w jednym cyklu – badania wstępne.

Zebrano 100 cykli obrotowych, na każdy cykl przypadało 399 pomiarów. W pierwszej kolejności wyznaczono prędkość kątową wzorcową, dokonano uśrednienia pomiarów, następnie przeprowadzono analizę porównawczą wyznaczając różnicę pomiędzy kątem wzorcowym a

kątem wyznaczonym na podstawie wskazań akcelerometru. Różnica wynosiła ponad 6° w fazie ruchu dla cykli wykonanych z prędkością ok. $220^\circ/\text{s}$.

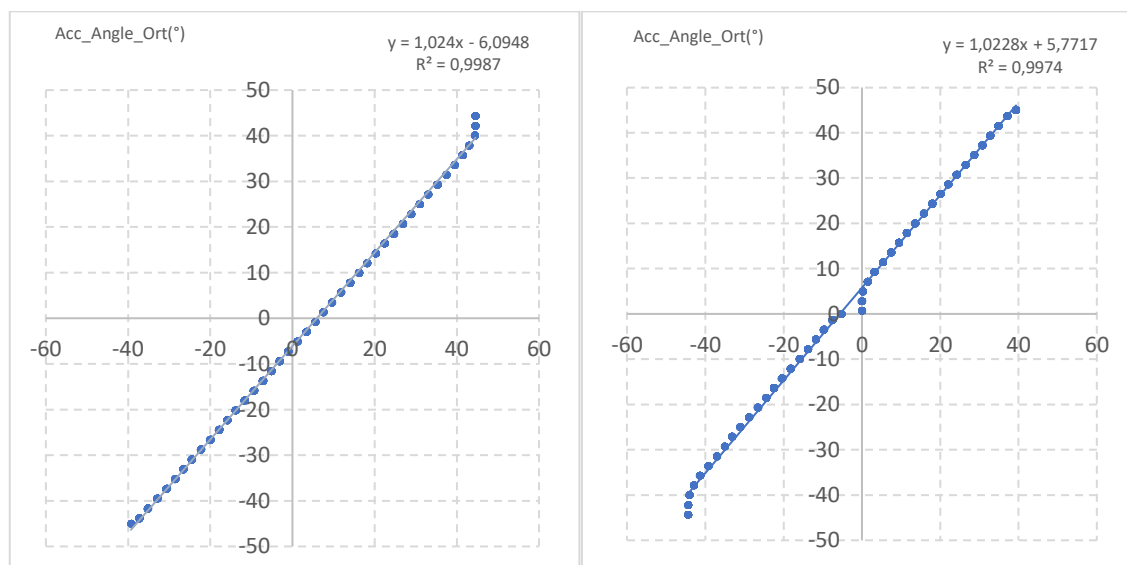


Rys. 14. Wykres prezentujący kąt wzorcowy silnika krokowego (stepper) oraz uśredniony kąt wyznaczony na podstawie wskazań akcelerometru.



Rys. 15. Wykres obrazujący średnią różnicę między kątem wzorcowym a średnim kątem wyznaczonym na podstawie wskazań akcelerometru oraz prędkości kątowej

Następnie pogrupowano próbki wg poszczególnych faz ruchu w lewo i prawo. Dla każdego kierunku wyznaczono równania regresji liniowej zależności pomiędzy kątem zmierzonym a wzorcowym.

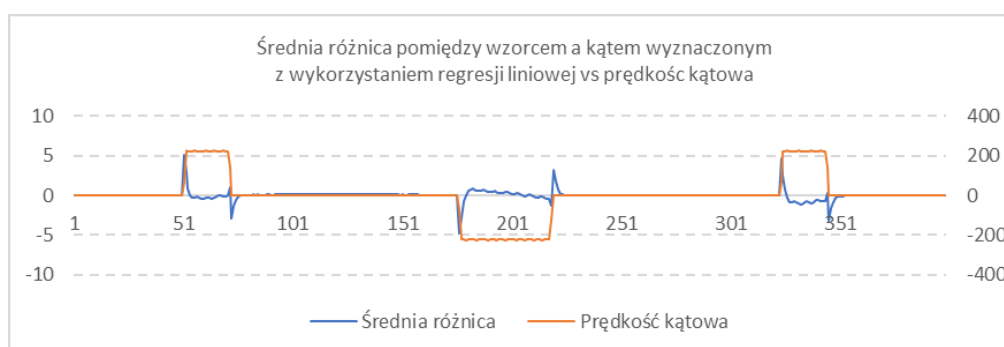


Rys. 16. Wykresy regresji liniowej dla kierunku w lewo i prawo wraz z odpowiadającymi im funkcjami regresji.

Wyznaczone równania pozwoliły na zastosowanie poprawek do pomiarów kąta dla każdego kierunku ruchu czego efektem było znaczne zmniejszenie średniej różnicy pomiędzy kątem wyznaczonym a kątem wzorcowym – co zobrazowano na poniższych wykresach.



Rys. 17. Wykres kąta wzorcowego silnika krokowego (stepper) oraz uśrednionego kąta wyznaczonego po zastosowaniu poprawek na bazie regresji liniowej.



Rys. 18. Wykres prędkości kątowej oraz średniej różnicy pomiędzy wzorcem a kątem wyznaczonym z wykorzystaniem regresji liniowej

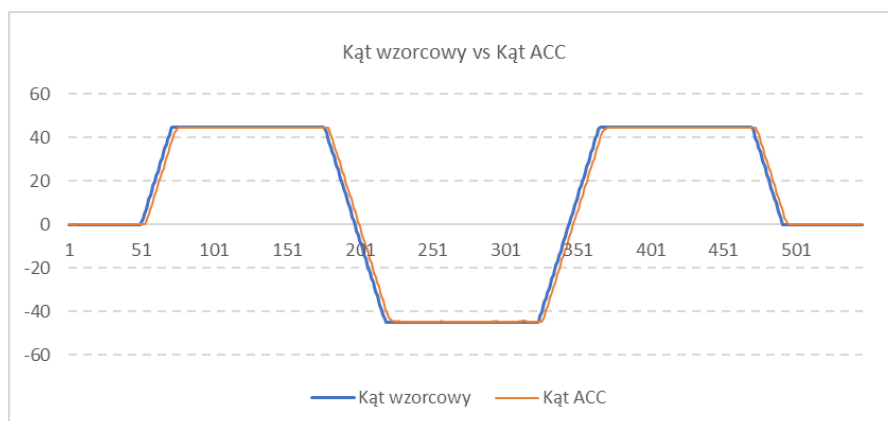
3.2.2 Badania regresji wielomianowej

Badania wstępne pokazały, że zastosowanie regresji liniowej pozwala na znaczne przybliżenie wyznaczonej wartości kąta do wzorca. W celu weryfikacji pomiarów kąta z ortometru dla różnych prędkości kątowych, w dalszych badaniach zmodyfikowano cykl obrotowy tak, by fazy ruchu w poszczególnych kierunkach były identyczne. Silnik krokowy w jednym cyklu obracał ramię w fazach: 0° do 45° , 45° do -45° , -45° do 45° oraz 45° do 0° .



Rys. 19. Wykres kąta wychylenia w jednym cyklu obrotowym stanowiska pomiarowego

Zebrane i zweryfikowane pliki z pomiarami wprowadzono do arkusza kalkulacyjnego, w którym przeprowadzono obliczenia prędkości kątowej wzorcowej oraz dokonano wstępnej analizy różnic pomiędzy kątem wzorcowym a kątem wyznaczonym przez oprogramowanie wbudowane na bazie wskazań akcelometru.



Rys. 20. Wykres kąta wzorcowego [°] oraz kąta wyznaczonego [°] na podstawie wskazań akcelometru.

Zaobserwowano występowanie różnic pomiędzy obliczonym kątem ACC a kątem wzorcowym, dla dziewięciu prędkości kątowych, wykonano szczegółową analizę statystyczną w środowisku Matlab. Analiza została wykonana dla próbek pogrupowanych względem kierunku ruchu – dla prędkości kątowej >0 (WZero), dla prędkości kątowej <0 (MZero) oraz $=0$ (Zero).

W poniższej tabeli przedstawiono wyniki dla największej zaprogramowanej prędkości kątowej.

Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
WZero	155,81	69,68	228,8										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	Wariancja	R2	RD2
Pomiar	5965	3,767	3,768	0,031	39,220	-44,610	19,260	-6,306	6,306	6,308	0,006	1,000	0,932

MZero	-164,32	-228,8	-69,68										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	Wariancja	R2	RD2
Pomiar	6421	-2,708	-2,707	0,022	44,530	-39,510	11,260	6,095	6,095	6,095	0,001	1,000	0,937

Zero	0	0	0										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	Wariancja	R2	RD2
Pomiar	41912	0,001	-0,017	0,341	44,800	-44,600	10,500	0,001	0,421	0,574	0,116	1,000	1,000

Tabela 3. Statystyki pomiarów kąta wyznaczonego z akcelometru oraz kąta wzorcowego pogrupowanych według kierunku ruchu

Z powyższego wynika, że niezależnie od fazy ruchu mediana jest bardzo zbliżona do średniej (dane symetryczne), niskie odchylenie świadczy, że dane pomiarowe są mało rozproszone, MAE wynosi ponad 6 stopni podczas obrotu, RMSE zbliżony do MAE – brak dużych błędów losowych, wariancja bardzo mała – potwierdza stabilność danych.

3.2.2.1 Wyznaczanie wielomianów odwrotnych dla poszczególnych prędkości kątowych i kierunków ruchu

W środowisku Matlab zaprogramowano procedury wyznaczania najlepszej regresji wielomianowej dla danych pogrupowanych w poszczególnych kierunkach. Procedura wyznaczania najlepszego wielomianu korzystała z funkcji *polyfit* i *polyval*. Skrypt przeprowadza kompleksową analizę danych pomiarowych dla jednego kierunku ruchu (prędkości kątowej). Obejmuje:

- grupowanie danych wg wzorców i prędkości,
- wyliczenie statystyk dla każdej grupy (średnia, mediana, odchylenie standardowe, min, max), współczynników determinacji (R^2)
- dopasowanie regresji wielomianowej do uśrednionych danych pomiarowych,
- dopasowanie regresji odwrotnej dla uśrednionych danych pomiarowych,
- porównanie wyników pomiarów i estymacji,
- zapis wyników badania oraz modeli regresji (pierwotnego i odwrotnego) w postaci wykresów i plików xls ,

```
% Inicjalizacja najlepszego R2
best_R2 = 0;
best_coeffs = [];
best_degree = 0;

% Sprawdź różne stopnie wielomianu - wprowadź max wartość wielomianu
for degree = 1:StopienWielomianu
    % Wylicz parametry regresji
    coeffs = polyfit(x, y, degree);
    % Wylicz wartość R2
    y_fit = polyval(coeffs, x);
    SSres = sum((y - y_fit).^2);
    SStot = sum((y - mean(y)).^2);
    R2 = 1 - SSres/SStot;
    % Zapisz wyniki w tabeli
    nowy_wiersz = table(degree, R2, {coeffs}, 'VariableNames', {'Stopień', 'R2', 'Parametr'});
    wyniki_regresji = [wyniki_regresji; nowy_wiersz];
    % Sprawdź, czy R2 jest lepszy niż dotychczasowy najlepszy
    if R2 > best_R2
        best_R2 = R2;
        best_coeffs = coeffs;
        best_degree = degree;
    end
end
```

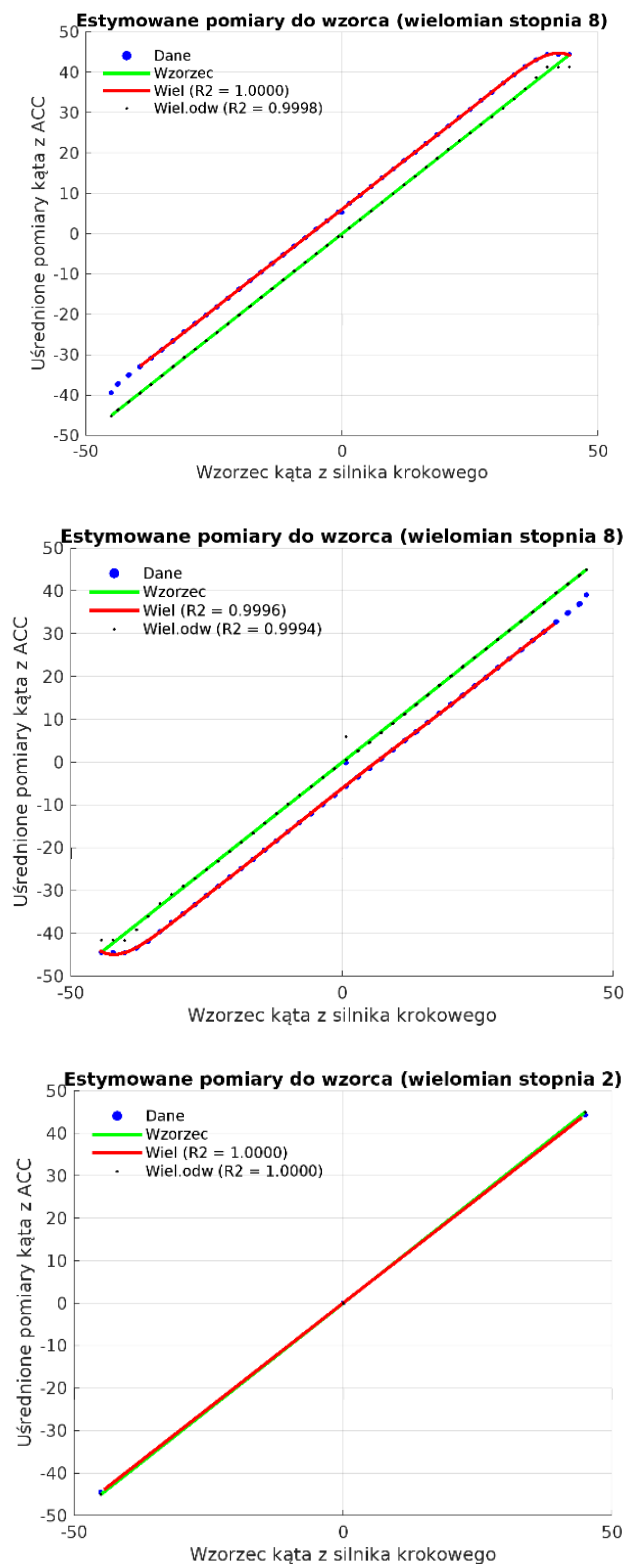
Listing 1. Fragment skryptu MATLAB - procedura wyznaczania wielomianu estymującego.

Wyznaczono następujące najlepsze wielomiany odwrotne dla każdego kierunku i prędkości obrotowej, w obliczeniach przyjęto maksymalny stopień wielomianu 8.

WarSrSpeed	Stopień	R2	X	X^2	X^3	X^4	X^5	X^6	X^7	X^8	
Kierunek WZero											
155,81	8	0,999391	-4,46315E-12	-2,09718E-11	1,38971E-08	2,87962E-08	-0,000014	-0,000006	0,004681	1,008802	6,052100
71,19	8	0,999915	-1,39421E-12	1,24796E-11	4,35993E-09	-3,394E-08	-0,000004	0,000024	0,001411	1,007484	3,242068
34,44	8	0,999984	-4,76384E-13	6,73866E-12	1,50139E-09	-1,68668E-08	-0,000001	0,000010	0,000500	1,010611	1,741642
28,60	8	0,999992	-2,58091E-13	4,43487E-12	8,28823E-10	-1,12957E-08	-0,000001	0,000006	0,000289	1,011548	1,242156
20,21	8	0,999994	-2,0253E-13	2,68754E-12	6,78411E-10	-6,62906E-09	-0,000001	0,000003	0,000278	1,011911	0,988218
12,90	8	0,999997	-6,37475E-14	2,19654E-13	2,25542E-10	3,22568E-10	-2,74073E-07	-0,000003	0,000117	1,013290	0,618996
8,84	8	0,999996	-7,51291E-14	4,91215E-13	2,71586E-10	-7,56444E-10	-3,29338E-07	-0,000001	0,000140	1,012897	0,431874
10,14	8	0,999996	-9,68134E-14	6,67686E-13	3,58803E-10	-1,23852E-09	-4,42222E-07	-0,000001	0,000189	1,012661	0,397197
Kierunek MZero											
-164,32	8	0,999777	2,96617E-12	-1,83644E-11	-8,49032E-09	3,07585E-08	7,39487E-06	-1,37968E-05	-0,001997	1,012147	-6,089718
-74,97	8	0,999962	1,01537E-12	6,66199E-12	-3,06005E-09	-1,69384E-08	2,77456E-06	9,80004E-06	-0,000780	1,011026	-3,111850
-34,53	8	0,999991	4,20431E-13	4,93011E-12	-1,24051E-09	-1,20557E-08	1,04787E-06	6,06819E-06	-0,000242	1,011800	-1,611099
-28,60	8	0,999995	1,77578E-13	2,78783E-12	-4,92172E-10	-6,44341E-09	3,48998E-07	2,23922E-06	-0,000033	1,012475	-1,113710
-20,21	8	0,999996	1,16895E-13	1,69473E-12	-3,19406E-10	-3,62453E-09	2,20769E-07	3,92049E-07	-0,000025	1,012785	-0,848373
-12,90	8	0,999997	-1,70836E-14	-3,97875E-13	1,10458E-10	2,05401E-09	-2,08066E-07	-3,94442E-06	0,000119	1,013830	-0,452801
-8,84	8	0,999997	-7,76582E-15	7,8472E-15	7,40578E-11	8,71063E-10	-1,67713E-07	-2,97814E-06	0,000104	1,013667	-0,257319
-10,14	8	0,999997	-2,67888E-15	2,81894E-13	5,54139E-11	4,5227E-11	-1,44434E-07	-2,23492E-06	0,000094	1,013348	-0,110340
Zero											
0	2	1	0,000043	1,013429	-0,058572						
0	2	1	0,000030	1,012996	-0,029100						
0	2	1	0,000026	1,012447	-0,025020						
0	2	1	0,000023	1,012539	-0,020456						
0	2	1	0,000024	1,012581	-0,018612						
0	2	1	0,000020	1,012759	-0,002400						
0	2	1	0,000017	1,012685	0,006329						
0	2	1	0,000031	1,012599	0,035358						

Tabela 4. Wielomiany odwrotne wyznaczone dla poszczególnych prędkości kątowych i kierunków ruchu na zbiorze danych surowych

Powyższe wielomiany zastosowano do estymacji pomiaru, wykresy estymacji dla największej badanej prędkości kątowej znajdują się poniżej dla poszczególnych kierunków ruchu.



Rys. 21. Wykresy estymacji pomiarów kąta do wzorca – u góry dla kierunku WZero, pośrodku MZero, na dole Zero.

Wyniki analizy statystycznej skuteczności estymacji z wykorzystaniem wyznaczonych wielomianów dla każdej prędkości kątowej przedstawiają poniższe tabele:

Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
WZero	155,81	69,68	228,80										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	5965,00	3,77	3,77	0,03	39,22	-44,61	19,26	-6,31	6,31	6,31	1,00	0,93	
Estymacja	5965,00	10,07	10,07	0,03	45,11	-41,88	20,61	0,00	0,24	0,24	1,00	0,93	
Poprawa [%]	0,00	-167,38	-167,36	-6,38	-15,02	6,12	-6,99	100,00	96,24	96,19	0,02	0,34	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
WZero	71,19	29,12	117,52										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	12252,00	9,36	9,36	0,02	41,98	-44,54	26,34	-3,40	3,40	3,40	1,00	0,98	
Estymacja	12252,00	12,76	12,76	0,02	45,38	-43,72	27,07	0,00	0,08	0,08	1,00	0,98	
Poprawa [%]	0,00	-36,32	-36,32	-1,96	-8,09	1,84	-2,78	100,00	97,70	97,59	0,00	0,05	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
WZero	34,44	6,24	59,28										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	22411,00	10,30	10,31	0,02	43,33	-44,70	53,37	-1,88	1,88	1,88	1,00	0,99	
Estymacja	22411,00	12,19	12,19	0,02	45,41	-44,25	54,09	0,00	0,04	0,05	1,00	0,99	
Poprawa [%]	0,00	-18,25	-18,25	-1,13	-4,79	1,00	-1,35	100,00	97,65	97,41	0,00	0,01	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
WZero	28,60	6,24	46,80										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	37771,00	11,18	11,18	0,02	43,65	-44,55	71,37	-1,38	1,38	1,38	1,00	1,00	
Estymacja	37771,00	12,56	12,56	0,02	45,29	-44,18	72,21	0,00	0,04	0,04	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	-12,36	-12,36	-1,12	-3,76	0,84	-1,17	100,00	97,07	96,75	0,00	0,01	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
WZero	20,21	6,24	30,16										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	45392,00	10,46	10,46	0,02	43,85	-44,66	84,24	-1,12	1,12	1,12	1,00	1,00	
Estymacja	45392,00	11,58	11,58	0,02	45,25	-44,43	85,18	0,00	0,04	0,04	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	-10,73	-10,73	-1,08	-3,18	0,51	-1,11	100,00	96,69	96,28	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
WZero	12,90	6,24	17,68										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	85251,00	5,08	5,08	0,02	44,09	-44,54	135,54	-0,68	0,68	0,68	1,00	1,00	
Estymacja	85251,00	5,77	5,77	0,02	45,13	-44,49	136,95	0,00	0,04	0,04	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	-13,40	-13,40	-1,04	-2,37	0,12	-1,04	100,00	94,29	93,52	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
WZero	8,84	5,20	12,48										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	168979,00	0,84	0,84	0,03	44,24	-44,65	255,29	-0,45	0,46	0,46	1,00	1,00	
Estymacja	168979,00	1,29	1,29	0,03	45,10	-44,78	258,04	0,00	0,05	0,05	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	-53,12	-53,07	-1,09	-1,96	-0,29	-1,08	100,00	89,87	88,27	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
WZero	10,14	5,20	17,68										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	202318,00	-0,41	-0,41	0,03	44,27	-44,57	236,73	-0,40	0,42	0,42	1,00	1,00	
Estymacja	202318,00	-0,01	0,00	0,03	45,10	-44,73	239,36	0,00	0,05	0,06	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	98,76	98,91	-1,12	-1,88	-0,37	-1,11	100,00	88,62	86,81	0,00	0,00	

Tabela 5. Statystyki pomiarów i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości kątowych większych od zera.

Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
MZero	-164,32	-228,80	-69,68										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	6421,00	-2,71	-2,71	0,02	44,53	-39,51	11,26	6,09	6,09	6,09	1,00	0,94	
Estymacja	6421,00	-8,80	-8,80	0,02	41,55	-45,21	12,12	0,00	0,15	0,16	1,00	0,93	
Poprawa [%]	0,00	-225,05	-225,11	-6,15	6,69	-14,43	-7,68	100,00	97,46	97,41	0,02	0,32	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
MZero	-74,97	-117,52	-35,36										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	12605,00	-3,59	-3,59	0,02	44,55	-42,12	19,86	3,16	3,17	3,17	1,00	0,98	
Estymacja	12605,00	-6,75	-6,75	0,02	43,36	-45,43	20,32	0,00	0,07	0,07	1,00	0,98	
Poprawa [%]	0,00	-88,25	-88,24	-1,94	2,68	-7,86	-2,32	100,00	97,85	97,73	0,00	0,05	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
MZero	-34,53	-59,28	-6,24										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	22213,00	-6,68	-6,68	0,02	44,56	-43,44	38,91	1,69	1,69	1,69	1,00	0,99	
Estymacja	22213,00	-8,37	-8,37	0,02	44,09	-45,37	39,44	0,00	0,04	0,05	1,00	0,99	
Poprawa [%]	0,00	-25,25	-25,25	-1,07	1,06	-4,43	-1,36	100,00	97,55	97,30	0,00	0,01	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
MZero	-28,60	-46,80	-6,24										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	38189,00	-7,15	-7,15	0,02	44,56	-43,57	56,88	1,19	1,19	1,19	1,00	1,00	
Estymacja	38189,00	-8,34	-8,34	0,02	44,26	-45,10	57,61	0,00	0,04	0,04	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	-16,62	-16,62	-1,21	0,68	-3,51	-1,29	100,00	96,91	96,57	0,00	0,01	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
MZero	-20,21	-30,16	-6,24										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	45869,00	-4,87	-4,87	0,02	44,61	-43,82	73,02	0,90	0,90	0,91	1,00	1,00	
Estymacja	45869,00	-5,77	-5,77	0,02	44,46	-45,11	73,95	0,00	0,04	0,04	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	-18,55	-18,55	-1,21	0,33	-2,94	-1,28	100,00	95,92	95,38	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
MZero	-12,90	-17,68	-6,24										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	85602,00	-5,54	-5,54	0,02	44,54	-44,15	137,38	0,51	0,51	0,51	1,00	1,00	
Estymacja	85602,00	-6,04	-6,04	0,02	44,59	-45,08	138,91	0,00	0,04	0,04	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	-9,18	-9,18	-1,12	-0,11	-2,10	-1,11	100,00	92,42	91,39	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
MZero	-8,84	-12,48	-5,20										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	170340,00	-1,02	-1,02	0,03	44,54	-44,32	244,36	0,26	0,32	0,33	1,00	1,00	
Estymacja	170340,00	-1,29	-1,29	0,03	44,79	-45,07	247,11	0,00	0,05	0,05	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	-25,63	-25,63	-1,12	-0,56	-1,70	-1,13	100,00	86,06	83,94	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
MZero	-10,14	-17,68	-5,20										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	202202,00	0,11	0,11	0,03	44,38	-44,46	232,43	0,10	0,27	0,27	1,00	1,00	
Estymacja	202202,00	0,01	0,00	0,03	44,78	-45,06	235,03	0,00	0,05	0,05	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	95,30	95,68	-1,12	-0,90	-1,36	-1,12	100,00	83,22	80,63	0,00	0,00	

Tabela 6. Statystyki pomiarów i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości kątowych mniejszych od zera.

Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
Zero	0,00	0,00	0,00										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	41912,00	0,00	-0,02	0,34	44,80	-44,60	10,50	0,00	0,42	0,57	1,00	1,00	
Estymacja	41912,00	0,00	-0,02	0,35	45,43	-45,17	10,64	0,00	0,10	0,35	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	99,66	-9,37	-1,35	-1,41	-1,28	-1,36	99,66	75,44	39,80	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
Zero	0,00	0,00	0,00										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	42016,00	-0,01	-0,02	0,17	44,54	-44,60	5,31	-0,01	0,40	0,46	1,00	1,00	
Estymacja	42016,00	0,00	-0,01	0,17	45,15	-45,15	5,38	0,00	0,06	0,17	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	100,01	47,82	-1,28	-1,37	-1,23	-1,30	100,01	85,63	62,63	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
Zero	0,00	0,00	0,00										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	42028,00	-0,01	-0,01	0,08	44,67	-44,67	3,62	-0,01	0,38	0,40	1,00	1,00	
Estymacja	42028,00	0,00	0,00	0,08	45,25	-45,20	3,67	0,00	0,03	0,08	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	100,00	64,26	-1,23	-1,30	-1,19	-1,25	100,00	91,45	80,37	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
Zero	0,00	0,00	0,00										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	42113,00	-0,01	-0,01	0,07	44,60	-44,57	2,52	-0,01	0,38	0,39	1,00	1,00	
Estymacja	42113,00	0,00	0,00	0,07	45,19	-45,10	2,55	0,00	0,03	0,07	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	100,00	77,15	-1,24	-1,31	-1,20	-1,26	100,00	92,52	83,13	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
Zero	0,00	0,00	0,00										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	39107,00	-0,01	-0,02	0,05	44,50	-44,56	2,00	-0,01	0,38	0,39	1,00	1,00	
Estymacja	39107,00	0,00	0,00	0,05	45,09	-45,09	2,03	0,00	0,02	0,05	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	100,00	80,06	-1,25	-1,33	-1,19	-1,27	100,00	93,60	87,39	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
Zero	0,00	0,00	0,00										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	41610,00	-0,02	-0,02	0,03	44,49	-44,55	1,27	-0,02	0,38	0,39	1,00	1,00	
Estymacja	41610,00	0,00	0,00	0,04	45,09	-45,08	1,29	0,00	0,02	0,04	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	100,00	100,28	-1,27	-1,36	-1,19	-1,28	100,00	94,40	90,98	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
Zero	0,00	0,00	0,00										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	42083,00	-0,03	-0,03	0,03	44,50	-44,59	1,02	-0,03	0,38	0,39	1,00	1,00	
Estymacja	42083,00	0,00	0,00	0,03	45,10	-45,11	1,03	0,00	0,02	0,03	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	100,00	95,60	-1,27	-1,36	-1,18	-1,27	100,00	94,07	91,88	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
Zero	0,00	0,00	0,00										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	42296,00	-0,07	-0,08	0,03	44,44	-44,63	0,93	-0,07	0,39	0,39	1,00	1,00	
Estymacja	42296,00	0,00	0,00	0,03	45,10	-45,10	0,94	0,00	0,02	0,03	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	100,00	97,65	-1,26	-1,48	-1,04	-1,27	100,00	94,73	93,12	0,00	0,00	

Tabela 7. Statystyki pomiarów i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości kątowych równych zero.

MAE wartości pomiarowych rośnie z prędkością kątową i wynosi: od 0,42° do 6,31° (WZero) (Tabela 5) oraz od 0,27° do 6,09° (MZero) (Tabela 6). Wyznaczone wielomiany odwrotne skutecznie działają dla danej prędkości kątowej. W zależności od prędkości kątowej zastosowanie dedykowanego wielomianu odwrotnego wpływa na poprawę wartości MAE: dla kierunku WZero wynosi od 88,62% do 97,70%, dla kierunku MZero od 83,22% do 97,85%, dla MZero od 75,44% do 94,73%. W efekcie wartości MAE estymacji wynoszą od 0,05° do 0,24° dla

WZero, oraz od $0,05^\circ$ do $0,16^\circ$ dla kierunku MZero. Dla pomiarów w fazie ruchu procentowa wartość poprawy MAE rośnie wraz z prędkością kątową. Wartości MAE pomiarów zarejestrowanych w bezruchu (Tabela 7) wyniosły od 0,38 do 0,42, a MAE estymacji od 0,02 do 0,1.

3.2.3 Badania regresji z wykorzystaniem modeli sieci neuronowych

W niniejszej pracy zastosowano sztuczne sieci neuronowe jako jedną z metod estymacji. Modele neuronowe zostały wytrenowane w trybie CPU przy użyciu algorytmu Levenberg-Marquardt (trainlm), który charakteryzuje się dużą skutecznością i szybkością działania w przypadku średnich zbiorów danych. Jest to algorytm, który charakteryzuje się szybkim tempem zbieżności, szczególnie przy dużej liczbie parametrów. Proces treningu opierał się na nadzorowanym uczeniu, mającym na celu minimalizację błędów pomiędzy danymi rzeczywistymi a wynikami predykcji. W celu zbadania wpływu różnych podejść na jakość uczenia oraz dokładność modelu, przygotowano dwie niezależne konfiguracje sieci neuronowych, dla prędkości kątowych większych od zera oraz mniejszych od zera.

Wykonano w środowisku MATLAB kompleksowy system automatycznej optymalizacji i treningu sieci neuronowej (ANN), przeznaczony do modelowania zależności pomiędzy pomiarami a wzorcami kątów (wyznaczonym na podstawie wskazań z czujnika typu ACC a wzorcem z silnika krokowego).

Liczba epok została ustawiona na 100, co oznacza, że każda sieć była trenowana przez 100 pełnych przejść przez zbiór danych. Dodatkowo, zastosowano ograniczenie liczby ewaluacji funkcji celu do MaxObjEvaluations, co przekładało się na testowanie maksymalnie MaxObjEvaluations różnych konfiguracji sieci neuronowej w procesie optymalizacji i znalezienia najlepszych parametrów modelu. Pozwoliło to na automatyczne dopasowanie struktury modelu do charakterystyki danych w obrębie ustalonych granic.

Jeśli chodzi o strukturę sieci, liczba warstw ukrytych została ograniczona do zakresu od 1 do 3, co pozwalało na dostosowanie głębokości sieci w zależności od stopnia złożoności problemu. Zwiększenie liczby warstw ukrytych umożliwiało modelowanie bardziej złożonych zależności, ale również niosło ze sobą ryzyko nadmiernego dopasowania modelu do danych (overfitting). Dodatkowo, liczba neuronów w warstwie ukrytej mogła wynosić od 5 do 50, co pozwalało na elastyczne dopasowanie liczby neuronów do specyfiki danych. Zastosowano dynamiczne przypisanie liczby warstw oraz neuronów, co zapewniało jeszcze większą elastyczność w procesie budowy modelu. Parametr layers = x.Layers odnosił się do liczby warstw w sieci, a neurons = [x.Neurons1, x.Neurons2, x.Neurons3] przechowywał liczbę neuronów w każdej warstwie. Dzięki

temu sieć mogła być łatwo dostosowana do konkretnych potrzeb. Sieć była tworzona przy użyciu funkcji `feedforwardnet`, która generuje klasyczną sieć perceptronową z pełnym połączeniem między warstwami. Liczba warstw i neuronów była dynamicznie przypisywana w oparciu o wcześniej zdefiniowane parametry. Ważnym elementem konfiguracji była również definicja celu błędu treningowego – `net.trainParam.goal = 1e-6`, co oznaczało, że proces treningowy trwał aż do momentu, gdy błąd sieci osiągnął wartość mniejszą niż $1e-6$.

Zmienna `layers` wskazywała na liczbę warstw w sieci, a `neurons` przechowywała liczbę neuronów w poszczególnych warstwach, odnosząc się do danych z obiektu `x`.

Zadaniem skryptu było wykonanie:

- automatycznej filtracji i selekcji danych pomiarowych,
- optymalizacji architektury sieci neuronowej (liczba warstw, neuronów),
- treningu sieci na danych wejściowych (Pomiary → Wzorce),
- oceny jakości modelu (na zbiorach walidacyjnych i testowych),
- zapisu wyników oraz najlepszej sieci do dalszego użycia.

Etapy działania skryptu:

1. Przygotowanie danych - wczytanie danych oraz filtracja próbek m.in. po fazach cyklu, ruchu i kierunku obrotu.
2. Podział danych na zbiory - dane zostały podzielone losowo na:
 - treningowe (70%),
 - walidacyjne (15%),
 - testowe (15%).
3. Definicja przestrzeni hiperparametrów
 - Zmienna liczba warstw (1-3).
 - Liczba neuronów w każdej warstwie (3-15).
 - Zmienne definiowane jako `optimizableVariable` — są wejściem dla `bayesopt`.
 - Optymalizacja architektury.
4. Trening końcowy sieci:
 - Zbudowanie sieci `feedforwardnet` z optymalnymi parametrami.
 - Trenowanie z użyciem `trainlm` (Levenberg-Marquardt).
 - Zapis sieci do pliku `.mat`.
5. Ewaluacja wyników - obliczenie metryk jakości na zbiorach `validation` i `test`, m.in.: MAE, RMSE, R^2 , mean, median, std, range, max, min.
6. Generowanie wykresów

7. Pomiar czasu - całkowity czas wykonania skryptu mierzony przez tic/toc.

```
function perfVal = objectiveFunction(x, inputsTrain, targetsTrain, inputsVal, targetsVal)
    layers = x.Layers; % Prawidłowe odniesienie do liczby warstw
    neurons = [x.Neurons1, x.Neurons2, x.Neurons3];
    % Tworzenie i uczenie sieci neuronowej z danymi hiperparametrami
    net = feedforwardnet(neurons(1:layers));

    % Ustawienie maksymalnej liczby epok na 100
    %net.trainFcn = 'trainscg'; % Funkcja trenowania
    net.trainFcn = 'trainlm';
    net.trainParam.goal = 1e-6; % Cel błędu treningowego
    net.trainParam.epochs = 100; % epoki trenowania sieci

    [net, tr] = train(net, inputsTrain, targetsTrain);
    % Ocena wydajności na danych walidacyjnych
    outputsVal = net(inputsVal);
    perfVal = perform(net, targetsVal, outputsVal); % Wydajność na danych walidacyjnych
    %loss = perfVal; % Możesz dostosować funkcję straty według potrzeb
End
```

Listing 2. Funkcja *objectiveFunction* – funkcja celu w procesie optymalizacji

Funkcja *objectiveFunction* to funkcja celu używana w procesie optymalizacji hiperparametrów sieci neuronowej (ANN) — z wykorzystaniem algorytmu *bayesopt* [181]. Jej zadaniem jest:

- zbudowanie sieci neuronowej na podstawie aktualnych parametrów (liczba warstw i neuronów),
- przeprowadzenie treningu na danych treningowych,
- ocena jakości sieci na zbiorze walidacyjnym, a następnie
- zwrócenie tej wartości jako metryki błędu (do minimalizacji).

Badania przeprowadzono dla pomiarów z pierwszego stanowiska badawczego dla zakresu prędkości kątowych od $1,76^\circ/\text{s}$ (zbiór 12) do $28,125^\circ/\text{s}$ (zbiór 16) dla kierunku MZero i WZero.

Poniżej przedstawiono proces i wyniki modelowania dla prędkości $3,52^\circ/\text{s}$ (indeks zbioru danych 13) z wykorzystaniem sieci neuronowych, skupiając się na najlepszych parametrach modelu, jego wydajności oraz szczegółach dotyczących optymalizacji.

Optymalizacja modelu sieci neuronowej została przeprowadzona z wykorzystaniem różnych konfiguracji liczby warstw ukrytych oraz liczby neuronów w każdej warstwie. Proces optymalizacji obejmował 50 ewaluacji funkcji celu. Każda iteracja miała na celu dostosowanie parametrów modelu, aby osiągnąć jak najlepszy wynik funkcji celu. W każdej iteracji monitorowano następujące parametry:

- Eval result (Wynik ewaluacji): Określa, czy wynik w danej iteracji był najlepszym dotychczasowym wynikiem ("Best") lub zaakceptowanym wynikiem ("Accept").
- Objective (Funkcja celu): Wartość funkcji celu, która była optymalizowana w celu osiągnięcia jak najmniejszej wartości.
- Objective runtime (Czas obliczeń funkcji celu): Czas wymagany na obliczenie wartości funkcji celu w danej iteracji.
- BestSoFar (Najlepszy wynik dotychczas): Najlepsza osiągnięta wartość funkcji celu w procesie optymalizacji : "observed" (obserwowana) i "estimated" (szacowana).
- Layers (Warstwy): Liczba warstw w sieci neuronowej.
- Neurons1, Neurons2, Neurons3 (Neurony w warstwach): Liczba neuronów w poszczególnych warstwach sieci.

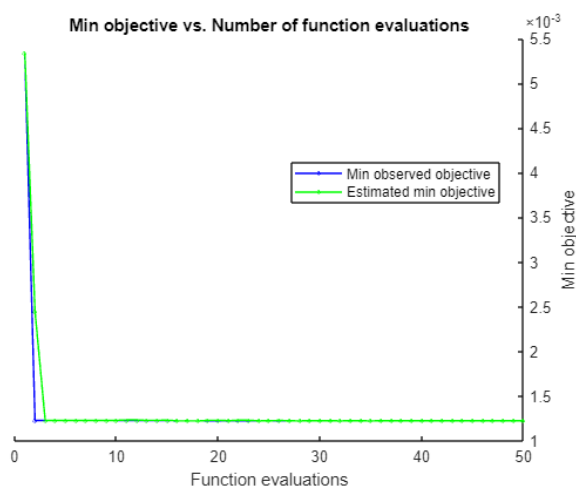
Iter	Eval	Objective	Objective runtime	BestSoFar	BestSoFar	Layers	Neurons1	Neurons2	Neurons3
1	Best	0.0053367	46.331	0.0053367	0.0053367	2	34	6	13
2	Best	0.0012297	1125.6	0.0012297	0.0024513	3	44	30	50
3	Accept	0.001671	33.885	0.0012297	0.0012299	2	12	17	41
4	Accept	0.0013812	361.31	0.0012297	0.0012298	3	39	42	5
5	Accept	0.001296	31.65	0.0012297	0.0012299	1	46	35	40
6	Accept	0.0029217	37.074	0.0012297	0.0012299	2	5	31	45
7	Accept	0.0012681	275.65	0.0012297	0.0012302	2	42	36	50
8	Accept	0.0041172	3.2825	0.0012297	0.00123	1	6	5	9
9	Accept	0.001259	212.25	0.0012297	0.0012299	3	36	23	20
10	Accept	0.0012392	3665.9	0.0012297	0.0012298	3	50	50	45
11	Accept	0.0014894	24.459	0.0012297	0.0012358	1	30	26	50
12	Accept	0.001365	867.4	0.0012297	0.0012356	3	16	50	37
13	Accept	0.0012645	207.09	0.0012297	0.0012306	2	50	26	41
14	Accept	0.0012344	1039.5	0.0012297	0.0012306	3	35	50	24
15	Accept	0.0012442	1378.5	0.0012297	0.0012333	3	50	38	35
16	Best	0.0012253	354.59	0.0012253	0.0012253	3	50	32	8
17	Accept	0.0012825	226.87	0.0012253	0.0012254	3	45	27	6
18	Accept	0.0012461	809.73	0.0012253	0.001224	2	50	46	49
19	Accept	0.0012402	924.82	0.0012253	0.001231	3	50	30	39
20	Accept	0.0012352	3208.5	0.0012253	0.001232	3	44	49	47
21	Accept	0.0013451	29.522	0.0012253	0.001227	1	42	50	40
22	Accept	0.0012522	1352.3	0.0012253	0.0012319	3	46	34	48
23	Accept	0.0013117	32.139	0.0012253	0.0012319	1	45	22	31
24	Accept	0.0012389	1739.1	0.0012253	0.0012252	3	50	47	25
25	Accept	0.0012547	796.74	0.0012253	0.001226	3	50	43	6
26	Accept	0.0012385	2435.5	0.0012253	0.0012301	3	50	46	38
27	Accept	0.0012388	1109.6	0.0012253	0.0012255	3	47	31	49
28	Accept	0.0014834	47.448	0.0012253	0.0012253	2	30	10	39
29	Accept	0.0017131	33.659	0.0012253	0.0012257	2	26	6	50
30	Accept	0.0013573	83.013	0.0012253	0.0012256	3	23	8	50
31	Accept	0.0030208	70.876	0.0012253	0.0012257	3	5	45	8
32	Accept	0.0012457	32.385	0.0012253	0.0012252	1	50	45	5
33	Accept	0.0012649	205.7	0.0012253	0.0012258	3	33	15	50
34	Accept	0.0012463	31.182	0.0012253	0.0012259	1	50	25	17
35	Accept	0.0025035	1010.8	0.0012253	0.001225	3	5	50	50
36	Accept	0.0012694	335.19	0.0012253	0.0012259	3	41	29	20
37	Accept	0.0012324	1095	0.0012253	0.0012261	3	27	47	37
38	Accept	0.001247	31.049	0.0012253	0.0012262	1	50	32	50
39	Accept	0.004179	2.9174	0.0012253	0.0012265	1	5	27	50
40	Accept	0.0014048	29.072	0.0012253	0.0012265	1	41	22	5
41	Accept	0.0013661	29.612	0.0012253	0.0012266	1	42	7	50
42	Accept	0.0016731	69.214	0.0012253	0.0012263	3	24	9	26
43	Accept	0.0012425	551.81	0.0012253	0.0012265	3	36	30	37
44	Accept	0.0012789	571.61	0.0012253	0.0012264	2	46	46	45
45	Accept	0.0041581	24.831	0.0012253	0.0012256	2	18	5	36
46	Accept	0.001294	71.375	0.0012253	0.0012254	2	34	17	50
47	Accept	0.0017653	28.478	0.0012253	0.0012254	2	11	14	11
48	Accept	0.0018401	48.668	0.0012253	0.0012254	2	23	15	26
49	Accept	0.0021705	27.844	0.0012253	0.0012254	2	11	11	31
50	Accept	0.0021192	51.278	0.0012253	0.0012254	3	8	17	14

Tabela 8. Kolejne iteracje procesu optymalizacji modelu sieci neuronowej

W trakcie procesu optymalizacji najlepsze wyniki funkcji celu uzyskano w iteracjach 1, 2 oraz 16 z minimalną wartością 0,0012253 w iteracji 16. Taka wartość sugeruje, że model osiągnął bardzo dobre dopasowanie do danych. Wartości funkcji celu sukcesywnie malały w kolejnych iteracjach, co wskazuje na efektywność procesu optymalizacji. W iteracji 1 wartość funkcji celu wynosiła 0,0053367, a w iteracji 16 spadła do 0,0012253, co pokazuje, że optymalizacja skutecznie prowadziła do poprawy dopasowania modelu.

Podczas optymalizacji dynamicznie zmieniała się struktura sieci, w tym liczba warstw i neuronów w poszczególnych warstwach. W iteracji 1 sieć składała się z 2 warstw z 34, 6 i 16 neuronami, podczas gdy w iteracji 16 struktura została zmieniona na 3 warstwy z 50, 32 i 8 neuronami. Te zmiany sugerują, że proces optymalizacji skutecznie dostosowywał architekturę sieci, aby uzyskać jak najlepsze wyniki. Czas obliczeń funkcji celu w różnych iteracjach wynikał z różnej konfiguracji sieci oraz liczby ocen funkcji celu w danej iteracji.

Proces optymalizacji zakończył się po 50 iteracjach, osiągając najlepszy wynik w iteracji 16, gdzie wartość funkcji celu wyniosła 0,0012253. Jest to bardzo niska wartość, która wskazuje na doskonałe dopasowanie modelu do danych. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że proces optymalizacji zakończył się sukcesem, osiągając bardzo niską wartość funkcji celu, co wskazuje na dobre dopasowanie modelu do danych.



Rys. 22. Wykres zależności minimalnej wartości funkcji celu od liczby ewaluacji funkcji

Najlepsza liczba warstw ukrytych wynosi 3, a liczby neuronów w poszczególnych warstwach to [50, 32, 8]. Model osiągnął wydajność 0.0012515 na danych walidacyjnych oraz 0.0012043 na danych testowych. Wartości błędów średnich (MeanError) oraz inne statystyki, takie jak MAE i RMSE, są przedstawione dla zbiorów walidacyjnych i testowych. Czas wykonania skryptu wyniósł 472.93 min.

Dataset	MeanError	MAE	RMSE	R2	Mean	Median	StdDev	Max	Min	Range
{'Validation'}	-0.00012686	0.026508	0.035377	1	7.2417	11.112	25.007	45.024	-44.885	89.91
{'Test'}	-0.00027054	0.026437	0.034703	1	7.7059	11.574	24.805	45.031	-44.9	89.931

Tabela 9. Statystyki modelu sieci neuronowej dla zbiorów walidacyjnych i testowych



Rys. 23. Parametry treningu sieci neuronowej (a), struktura modelu sieci neuronowej (b), przebieg funkcji błędu (MSE) podczas uczenia sieci (c), stan procesu uczenia sieci neuronowej (d)

Tak jak wspomniano wcześniej, z wykorzystaniem powyżej opisanej metody wygenerowano sieci neuronowe dla zbiorów danych z zakresu prędkości kątowych od 1,76°/s do 28,12°/s (indeksy zbiorów danych od 12 do 16) dla obu kierunków ruchu.

Dodatkowo wygenerowano model sieci neuronowej EstANNRaw na bazie zbioru pomiarowego obejmującego wszystkie prędkości kątowe dla obu kierunków ruchu w pełnym zakresie badanych prędkości kątowych. Zbiorcze podsumowanie parametrów wygenerowanych sieci neuronowych przedstawiono poniżej.

Nr	ω [°/s]	Id zbioru danych	Layers	Neurons1	Neurons2	Neurons3	Estimated objective function value
1.	1,76	12	3	50	21	50	0,0027914
2.	3,52	13	3	50	32	8	0,0012254
3.	7,031	14	3	20	49	50	0,0013306
4.	14,06	15	2	24	44	13	0,0009245
5.	28,12	16	3	50	13	50	0,0018392
6.	1,76:225,00	12:20	3	50	12	50	0.46449

Tabela 10. Zestaw parametrów architektury sieci neuronowych dla kierunku WZero wraz z wartością funkcji celu

Nr	ω [°/s]	Id zbioru danych	Layers	Neurons1	Neurons2	Neurons3	Estimated objective function value
1.	-1,76	12	3	50	38	48	0,002424
2.	-3,52	13	2	42	50	19	0,001106
3.	-7,03	14	2	41	36	45	0,001334
4.	-14,06	15	3	50	18	49	0,000957
5.	-28,12	16	2	50	39	37	0,001996

Tabela 11. Zestaw parametrów wygenerowanych sieci neuronowych dla kierunku MZero wraz z wartością funkcji celu

Nr	ω [°/s]	Id zbioru	Dataset	MeanError [°]	MAE [°]	RMSE	R2	Mean [°]	Median [°]	StdDev [°]	Max [°]	Min [°]
1.	1,76	12	Validation	0.00061261	0.039336	0.052529	1	7.508	11.045	24.671	45.028	-44.899
			Test	0.00092141	0.039247	0.051701	1	7.6552	11.498	25.015	45.017	-44.899
2.	3,52	13	Validation	-0.00012686	0.026508	0.035377	1	7.2417	11.112	25.007	45.024	-44.885
			Test	-0.00027054	0.026437	0.034703	1	7.7059	11.574	24.805	45.031	-44.9
3.	7,03	14	Validation	-5.4249e-05	0.028237	0.036485	1	7.6075	11.327	24.904	45.032	-44.885
			Test	-0.00015268	0.028295	0.036735	1	7.6619	11.593	24.891	45.023	-44.891
4.	14,06	15	Validation	2.7762e-05	0.023561	0.030047	1	7.7542	11.733	24.819	45.029	-44.849
			Test	-3.2282e-06	0.023694	0.030496	1	7.5795	11.605	24.867	45.023	-44.849
5.	28,12	16	Validation	-0.0011393	0.027122	0.045995	1	7.4788	11.359	25.102	45.005	-44.779
			Test	-0.00064617	0.027383	0.049190	1	7.2507	11.108	25.018	45.005	-44.798
6.	1,76:225,00	12:20	Validation	-0.003255	0.37182	0.68004	0.9992	8.2853	13.038	23.697	44.976	-44.521
			Test	0.0025445	0.36627	0.66209	0.9992	8.599	13.173	23.552	44.956	-44.532

Tabela 12. Statystyki modeli sieci neuronowych dla kierunku WZero dla zbiorów walidacyjnych i testowych

Nr	ω [°/s]	Id zbioru danych	Dataset	MeanError [°]	MAE [°]	RMSE [°]	R2	Mean [°]	Median [°]	StdDev [°]	Max [°]	Min [°]
1.	-1,76	12	Validation	0.00085625	0.037081	0.048799	1	7.4497	11.109	24.818	44.955	-45.018
			Test	-0.00027692	0.0371	0.049118	1	7.272	10.994	24.877	44.955	-44.995
2.	-3,52	13	Validation	0.00030337	0.0261	0.033985	1	7.2497	10.932	24.989	44.902	-45.03
			Test	0.0004357	0.025851	0.033968	1	7.5431	11.312	24.786	44.953	-45.03
3.	-7,03	14	Validation	-0.00016668	0.028562	0.036943	1	7.3446	11.102	24.875	44.914	-45.049
			Test	0.00025854	0.028509	0.037264	1	7.5716	11.384	24.879	44.948	-45.009
4.	-14,06	15	Validation	-0.00013367	0.02439	0.031379	1	7.1248	10.903	24.911	44.751	-45.015
			Test	-0.00066295	0.024278	0.031149	1	7.3595	11.231	24.937	44.751	-45.02
5.	-28,12	16	Validation	0.00058101	0.026323	0.044824	1	7.4055	11.347	24.841	44.671	-45.012
			Test	-0.00020144	0.026561	0.045029	1	7.553	11.074	24.652	44.665	-45.006

Tabela 13. Statystyki modeli sieci neuronowych dla kierunku MZero dla zbiorów walidacyjnych i testowych

Najniższą wartość MAE wśród modeli wygenerowanych dla kierunku WZero (Tabela 12) uzyskano dla modelu EstANN15 ($0,023561^\circ$ dla zbioru walidacyjnego oraz $0,023694^\circ$ dla zbioru testowego), co wskazuje na najlepszą jakość predykcji spośród porównywanych wariantów. Dla modeli EstANN12, EstANN13, EstANN14, EstANN16 - różnice pomiędzy wynikami walidacyjnymi i testowymi są niewielkie. EstANNRaw istotnie odstaje od pozostałych, osiągając wielokrotnie wyższy błąd (około 0.37°), co może wynikać z niekorzystnego doboru parametrów lub problemów w procesie uczenia.

3.3 Badania regresji na bazie pomiarów kąta wyznaczonego na podstawie akcelerometru i prędkości kątowej

W kolejnym etapie przystąpiono do badań metod regresji na bazie kąta wyznaczonego na podstawie wskazań akcelerometru i prędkości kątowej obrotu silnika krokowego. Poniżej przedstawiono przebieg i wyniki tych prac.

3.3.1 Badania regresji wielomianowej z uwzględnieniem prędkości kątowej

Wielomiany odwrotne uzyskane w badaniu 1 (rozdz. 3.2.2) estymują poprawnie wartości pomiarów dla danej prędkości kątowej. Można dopasować wartość wielomianu odwrotnego do danej wartości prędkości kątowej pomiaru. W tym celu opracowano metodę wyznaczania wielomianu odwrotnego dla danej prędkości kątowej.

W pierwszej kolejności zawężono zakresy prędkości kątowych na plikach pomiarów ze stanowiska 1. Następnie dla każdego z plików, wyznaczono wielomiany odwrotne dla średnich prędkości kątowych. Na bazie wyznaczonych wielomianów odwrotnych, wyznaczono wielomian odwrotny dla danej prędkości kątowej, który jest stosowany do estymacji pomiaru kąta.

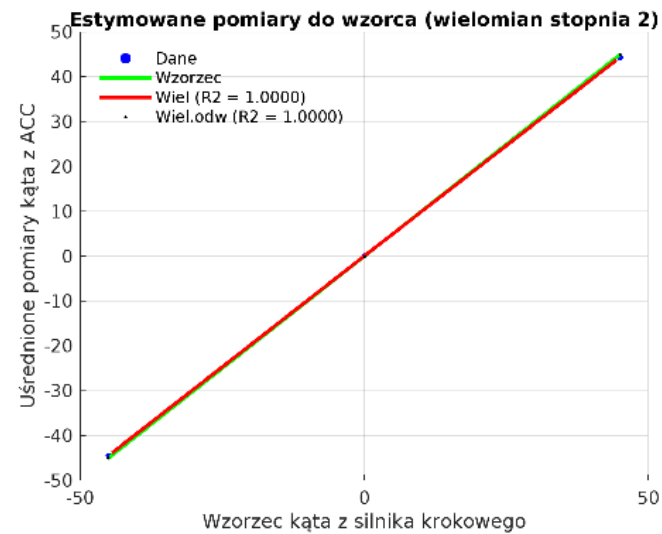
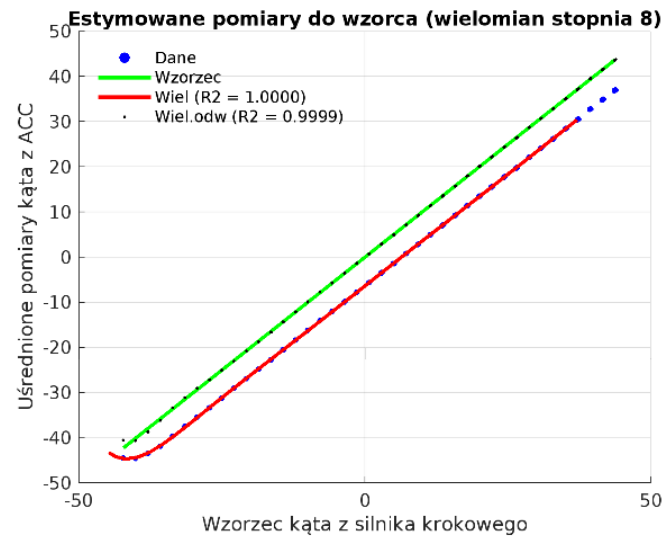
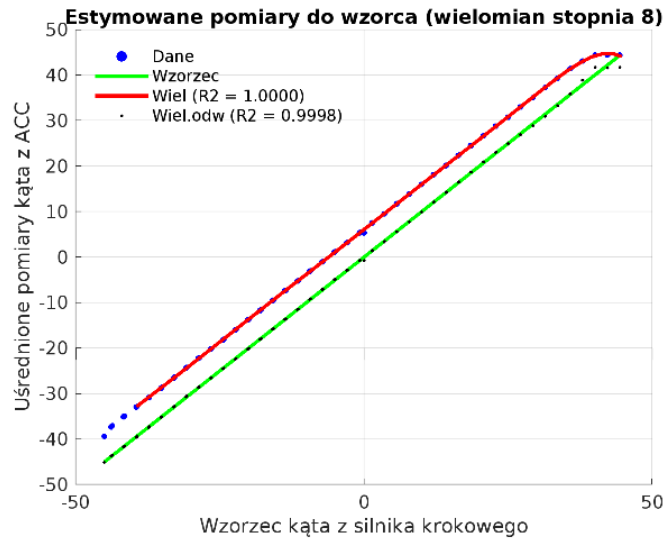
3.3.1.1 Filtracja pomiarów w celu zwiększenia dopasowania regresji wielomianowej

W kolejnym etapie dokonano filtracji pomiarów w celu wyznaczenia dokładniejszych wielomianów estymujących, aby to osiągnąć ograniczono pomiary do grup prędkości kątowych zawierających co najmniej 200 próbek. Poniżej znajduje się tabela z wyznaczonymi wielomianami odwrotnymi.

WarSrSpeed	Stopień	R2	X	X^2	X^3	X^4	X^5	X^6	X^7	X^8	
Kierunek WZero											
223,95	8	0,999919	-1,99493E-12	5,46985E-12	6,01199E-09	-2,54776E-08	-5,55173E-06	0,000024	0,001589	1,004694	6,353880
112,67	8	0,999990	-6,63969E-13	8,9492E-12	1,97609E-09	-2,36314E-08	-1,81122E-06	0,000016	0,000532	1,008941	3,318331
55,64	8	0,999995	-2,45235E-13	4,27627E-12	7,51258E-10	-1,022E-08	-7,22838E-07	0,000005	0,000237	1,011426	1,763230
37,96	8	0,999996	-1,59622E-13	3,34134E-12	5,00201E-10	-8,48567E-09	-4,94249E-07	0,000004	0,000169	1,011720	1,252198
26,52	8	0,999997	-1,21534E-13	1,65389E-12	4,06021E-10	-3,72067E-09	-4,49482E-07	0,000001	0,000179	1,012258	0,999001
14,56	8	0,999996	-1,69411E-14	-1,29028E-12	9,23584E-11	4,48026E-09	-1,64842E-07	-0,000006	0,000093	1,013968	0,626639
8,84	8	0,999996	-7,51291E-14	4,91215E-13	2,71586E-10	-7,56444E-10	-3,29338E-07	-0,000001	0,000140	1,012897	0,431874
5,72	8	0,999996	-6,01342E-14	1,61137E-13	2,49301E-10	2,28971E-10	-3,49339E-07	-0,000002	0,000169	1,012729	0,395963
Kierunek MZero											
-185,38	8	0,999799	3,35698E-12	-1,52015E-11	-9,64783E-09	2,09441E-08	8,39742E-06	-0,000006	-0,002259	1,010782	-6,077846
-98,18	8	0,999962	1,01537E-12	6,66199E-12	-3,06005E-09	-1,69384E-08	2,77456E-06	0,000010	-0,000780	1,011026	-3,111850
-48,05	8	0,999991	3,87393E-13	5,58702E-12	-1,13491E-09	-1,37646E-08	9,44975E-07	0,000007	-0,000211	1,011598	-1,612392
-37,96	8	0,999997	1,10835E-13	1,32553E-12	-2,81752E-10	-2,51218E-09	1,4519E-07	-0,000001	0,000028	1,012959	-1,116270
-26,52	8	0,999997	5,60289E-14	4,80224E-13	-1,21743E-10	-2,8948E-10	2,37246E-08	-0,000002	0,000038	1,013125	-0,853914
-14,56	8	0,999996	-5,86418E-14	-1,51826E-12	2,26758E-10	5,09394E-09	-2,95169E-07	-0,000006	0,000129	1,014317	-0,459962
-8,84	8	0,999997	-7,76582E-15	7,8472E-15	7,40578E-11	8,71063E-10	-1,67713E-07	-0,000003	0,000104	1,013667	-0,257319
-5,72	8	0,999997	-5,29505E-14	5,83876E-14	2,25313E-10	6,01861E-10	-3,21299E-07	-0,000003	0,000153	1,013235	-0,113653
Kierunek Zero											
0	2	1	0,000043	1,013429	-0,058572						
0	2	1	0,000030	1,012996	-0,029100						
0	2	1	0,000026	1,012447	-0,025020						
0	2	1	0,000023	1,012539	-0,020456						
0	2	1	0,000024	1,012581	-0,018612						
0	2	1	0,000020	1,012759	-0,002400						
0	2	1	0,000017	1,012685	0,006329						
0	2	1	0,000031	1,012599	0,035358						

Tabela 14. Wielomiany odwrotne wyznaczone dla poszczególnych prędkości kątowych na zbiorze danych przefiltrowanych

Powyższe wielomiany zastosowano do estymacji pomiaru, wykresy estymacji znajdują się poniżej dla poszczególnych kierunków ruchu.



Rys. 24. Wykresy estymacji kąta na bazie pomiarów filtrowanych do wzorca – u góry dla kierunku WZero, pośrodku MZero, na dole Zero.

Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
WZero	223,95	221,52	227,76										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	4412	4,79	4,79	0,02	37,08	-44,61	11,16	-6,40	6,40	6,40	1,00	0,93	
Estymacja	4412	11,20	11,20	0,03	43,78	-40,78	12,09	0,00	0,10	0,10	1,00	0,92	
Poprawa [%]		-133,59	-133,60	-6,20	-18,06	8,60	-8,29	100,00	98,43	98,37	0,01	0,35	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
WZero	112,67	110,24	116,48										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	10390	10,21	10,21	0,02	41,01	-44,53	23,40	-3,44	3,44	3,44	1,00	0,98	
Estymacja	10390	13,65	13,65	0,02	44,66	-42,92	23,91	0,00	0,04	0,05	1,00	0,98	
Poprawa [%]		-33,66	-33,66	-1,70	-8,91	3,62	-2,16	100,00	98,73	98,61	0,00	0,06	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
WZero	55,64	52,00	59,28										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	21923	10,45	10,45	0,02	42,76	-44,70	52,46	-1,89	1,89	1,89	1,00	0,99	
Estymacja	21923	12,34	12,34	0,02	44,93	-43,92	53,11	0,00	0,04	0,04	1,00	0,99	
Poprawa [%]		-18,07	-18,07	-1,11	-5,07	1,74	-1,25	100,00	98,06	97,82	0,00	0,01	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
WZero	37,96	34,32	41,60										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	32487	11,69	11,69	0,02	43,36	-44,55	64,16	-1,39	1,39	1,39	1,00	1,00	
Estymacja	32487	13,08	13,08	0,02	45,03	-44,05	64,89	0,00	0,04	0,04	1,00	1,00	
Poprawa [%]		-11,90	-11,90	-1,10	-3,86	1,11	-1,14	100,00	97,41	97,10	0,00	0,01	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
WZero	26,52	22,88	30,16										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	41057	10,86	10,86	0,02	43,54	-44,66	78,59	-1,13	1,13	1,13	1,00	1,00	
Estymacja	41057	11,99	11,99	0,02	44,97	-44,34	79,44	0,00	0,03	0,04	1,00	1,00	
Poprawa [%]		-10,42	-10,42	-1,07	-3,27	0,72	-1,08	100,00	97,02	96,62	0,00	0,01	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
WZero	14,56	11,44	17,68										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	49298	5,05	5,05	0,02	43,91	-44,17	88,75	-0,69	0,69	0,69	1,00	1,00	
Estymacja	49298	5,74	5,74	0,02	44,98	-43,99	89,68	0,00	0,04	0,04	1,00	1,00	
Poprawa [%]		-13,68	-13,68	-1,05	-2,43	0,40	-1,05	100,00	94,47	93,77	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
WZero	8,84	5,20	12,48										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	168979	0,84	0,84	0,03	44,24	-44,65	255,29	-0,45	0,46	0,46	1,00	1,00	
Estymacja	168979	1,29	1,29	0,03	45,10	-44,78	258,04	0,00	0,05	0,05	1,00	1,00	
Poprawa [%]		-53,12	-53,07	-1,09	-1,96	-0,29	-1,08	100,00	89,87	88,27	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
WZero	5,72	5,20	6,24										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	115019	-0,38	-0,38	0,03	43,75	-44,41	135,37	-0,41	0,41	0,42	1,00	1,00	
Estymacja	115019	0,03	0,03	0,03	44,60	-44,52	136,82	0,00	0,05	0,05	1,00	1,00	
Poprawa [%]		107,37	107,55	-1,07	-1,95	-0,25	-1,07	100,00	88,66	86,81	0,00	0,00	

Tabela 15. Statystyki pomiarów i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości kątowych większych od zera - grupy liczące co najmniej 200 próbek.

Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
MZero	-185,38	-227,76	-69,68										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	5914	-3,17	-3,17	0,02	44,53	-39,51	10,65	6,11	6,11	6,11	1,00	0,93	
Estymacja	5914	-9,28	-9,28	0,02	41,97	-45,18	11,48	0,00	0,15	0,16	1,00	0,93	
Poprawa [%]		-192,44	-192,48	-5,15	5,75	-14,35	-7,78	100,00	97,50	97,45	0,02	0,30	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
MZero	-98,18	-117,52	-35,36										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	12605	-3,59	-3,59	0,02	44,55	-42,12	19,86	3,16	3,17	3,17	1,00	0,98	
Estymacja	12605	-6,75	-6,75	0,02	43,36	-45,43	20,32	0,00	0,07	0,07	1,00	0,98	
Poprawa [%]		-88,25	-88,24	-1,94	2,68	-7,86	-2,32	100,00	97,85	97,73	0,00	0,05	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
MZero	-48,05	-59,28	-17,68										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	22129	-6,68	-6,68	0,02	44,56	-43,32	38,79	1,69	1,69	1,69	1,00	0,99	
Estymacja	22129	-8,37	-8,37	0,02	44,08	-45,29	39,35	0,00	0,04	0,05	1,00	0,99	
Poprawa [%]		-25,26	-25,26	-1,09	1,07	-4,55	-1,44	100,00	97,59	97,34	0,00	0,01	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
MZero	-37,96	-41,60	-34,32										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	32801	-7,80	-7,80	0,02	44,56	-43,45	50,86	1,20	1,20	1,20	1,00	1,00	
Estymacja	32801	-8,99	-8,99	0,02	44,13	-44,99	51,47	0,00	0,03	0,04	1,00	1,00	
Poprawa [%]		-15,35	-15,35	-1,14	0,96	-3,55	-1,20	100,00	97,21	96,88	0,00	0,01	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
MZero	-26,52	-30,16	-22,88										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	41680	-5,15	-5,15	0,02	44,61	-43,55	68,22	0,91	0,91	0,91	1,00	1,00	
Estymacja	41680	-6,06	-6,06	0,02	44,37	-44,86	69,02	0,00	0,03	0,04	1,00	1,00	
Poprawa [%]		-17,66	-17,66	-1,14	0,54	-3,00	-1,17	100,00	96,20	95,66	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
MZero	-14,56	-17,68	-11,44										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	49420	-5,58	-5,58	0,02	44,11	-43,99	90,19	0,52	0,52	0,52	1,00	1,00	
Estymacja	49420	-6,10	-6,10	0,02	44,06	-44,94	91,19	0,00	0,04	0,04	1,00	1,00	
Poprawa [%]		-9,29	-9,29	-1,13	0,10	-2,15	-1,11	100,00	92,60	91,65	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
MZero	-8,84	-12,48	-5,20										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	170340	-1,02	-1,02	0,03	44,54	-44,32	244,36	0,26	0,32	0,33	1,00	1,00	
Estymacja	170340	-1,29	-1,29	0,03	44,79	-45,07	247,11	0,00	0,05	0,05	1,00	1,00	
Poprawa [%]		-25,63	-25,63	-1,12	-0,56	-1,70	-1,13	100,00	86,06	83,94	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
MZero	-5,72	-6,24	-5,20										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	114983	0,07	0,07	0,03	44,18	-43,98	133,17	0,10	0,27	0,27	1,00	1,00	
Estymacja	114983	-0,03	-0,03	0,03	44,54	-44,60	134,60	0,00	0,05	0,05	1,00	1,00	
Poprawa [%]		137,49	138,39	-1,09	-0,81	-1,40	-1,08	100,00	83,14	80,48	0,00	0,00	

Tabela 16. Statystyki pomiarów i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości kątowych większych od zera - grupy liczące co najmniej 200 próbek.

Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
Zero	0	0,00	0,00										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	41912	0,00	-0,02	0,34	44,80	-44,60	10,50	0,00	0,42	0,57	1,00	1,00	
Estymacja	41912	0,00	-0,02	0,35	45,43	-45,17	10,64	0,00	0,10	0,35	1,00	1,00	
Poprawa [%]		99,66	-9,37	-1,35	-1,41	-1,28	-1,36	99,66	75,44	39,80	0,00	0,00	

Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
Zero	0	0,00	0,00										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	42016	-0,01	-0,02	0,17	44,54	-44,60	5,31	-0,01	0,40	0,46	1,00	1,00	
Estymacja	42016	0,00	-0,01	0,17	45,15	-45,15	5,38	0,00	0,06	0,17	1,00	1,00	
Poprawa [%]		100,01	47,82	-1,28	-1,37	-1,23	-1,30	100,01	85,63	62,63	0,00	0,00	

Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
Zero	0	0,00	0,00										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	42028	-0,01	-0,01	0,08	44,67	-44,67	3,62	-0,01	0,38	0,40	1,00	1,00	
Estymacja	42028	0,00	0,00	0,08	45,25	-45,20	3,67	0,00	0,03	0,08	1,00	1,00	
Poprawa [%]		100,00	64,26	-1,23	-1,30	-1,19	-1,25	100,00	91,45	80,37	0,00	0,00	

Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
Zero	0	0,00	0,00										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	42113	-0,01	-0,01	0,07	44,60	-44,57	2,52	-0,01	0,38	0,39	1,00	1,00	
Estymacja	42113	0,00	0,00	0,07	45,19	-45,10	2,55	0,00	0,03	0,07	1,00	1,00	
Poprawa [%]		100,00	77,15	-1,24	-1,31	-1,20	-1,26	100,00	92,52	83,13	0,00	0,00	

Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
Zero	0	0,00	0,00										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	39107	-0,01	-0,02	0,05	44,50	-44,56	2,00	-0,01	0,38	0,39	1,00	1,00	
Estymacja	39107	0,00	0,00	0,05	45,09	-45,09	2,03	0,00	0,02	0,05	1,00	1,00	
Poprawa [%]		100,00	80,06	-1,25	-1,33	-1,19	-1,27	100,00	93,60	87,39	0,00	0,00	

Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
Zero	0	0,00	0,00										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	41610	-0,02	-0,02	0,03	44,49	-44,55	1,27	-0,02	0,38	0,39	1,00	1,00	
Estymacja	41610	0,00	0,00	0,04	45,09	-45,08	1,29	0,00	0,02	0,04	1,00	1,00	
Poprawa [%]		100,00	100,28	-1,27	-1,36	-1,19	-1,28	100,00	94,40	90,98	0,00	0,00	

Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
Zero	0	0,00	0,00										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	42083	-0,03	-0,03	0,03	44,50	-44,59	1,02	-0,03	0,38	0,39	1,00	1,00	
Estymacja	42083	0,00	0,00	0,03	45,10	-45,11	1,03	0,00	0,02	0,03	1,00	1,00	
Poprawa [%]		100,00	95,60	-1,27	-1,36	-1,18	-1,27	100,00	94,07	91,88	0,00	0,00	

Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed										
Zero	0	0,00	0,00										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	42296	-0,07	-0,08	0,03	44,44	-44,63	0,93	-0,07	0,39	0,39	1,00	1,00	
Estymacja	42296	0,00	0,00	0,03	45,10	-45,10	0,94	0,00	0,02	0,03	1,00	1,00	
Poprawa [%]		100,00	97,65	-1,26	-1,48	-1,04	-1,27	100,00	94,73	93,12	0,00	0,00	

Tabela 17. Statystyki pomiarów i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości kątowych równych zero - grupy liczące co najmniej 200 próbek.

Dla danych obejmujących grupy zarejestrowanych pomiarów zawierające co najmniej 200 próbek MAE wartości pomiarowych także rośnie z prędkością kątową i wynosi: od 0,42 do 6,40° (WZero) (Tabela 15) oraz od 0,27 do 6,11° (MZero) (Tabela 16). Jednocześnie zawęża się zakres prędkości, przykładowo dla najwyższej prędkości kierunku WZero z [69,68°/s, 228,80°/s] (wszystkie grupy) (Tabela 5) do [221,52°/s, 227,76°/s] (grupy zawierające co najmniej 200 próbek) (Tabela 15).

Jako prędkość wzorcową dla danego wielomianu odwrotnego wybierana jest wartość WarSrSpeed.

Wyznaczone wielomiany odwrotne równie skutecznie działają dla danej prędkości kątowej. W zależności od prędkości kątowej poprawa wartości MAE estymacji: dla kierunku WZero wynosi od 86,81% do 98,37%, dla kierunku MZero od 80,48% do 97,73% i jest wyższa niż dla wielomianów odwrotnych wyznaczonych przed grupowaniem. Dla pomiarów w fazie ruchu wartość poprawy MAE także rośnie wraz z prędkością kątową.

3.3.1.2 Filtracja pomiarów w fazie rozruchu w celu zwiększenia dopasowania regresji wielomianowej

W celu uzyskania jak najbardziej dokładnych wielomianów dokonano dodatkowej filtracji, polegającej na pominięciu próbek w fazach rozruchowych cyklu. Każdy cykl w danym pliku z wartościami pomiarowymi dla danej prędkości kątowej składa się z identycznej liczby faz i próbek. Procedura filtracji na podstawie liczby próbek w cyklu pomijała odpowiednią liczbę próbek.

```
SamplesCykl = data{1, 33 }; % liczba próbek na cykl

switch SamplesCykl
case 546 % fazy: 50, 21, 105, 42, 105, 42, 105, 21, 55 % speed20
    fazyCyklu = [ 50, 21, 105, 42, 105, 42, 105, 21, 55 ];
    lbaPominietychProbek = 2;
case 672 % fazy: 50, 42, 105, 84, 105, 84, 105, 42, 55 % speed19
    fazyCyklu = [ 50, 42, 105, 84, 105, 84, 105, 42, 55 ];
    lbaPominietychProbek = 4;
case 924 % fazy: 50, 84, 105, 168, 105, 168, 105, 84, 55 % speed18
    fazyCyklu = [ 50, 84, 105, 168, 105, 168, 105, 84, 55 ];
    lbaPominietychProbek = 6;
case 1174 % fazy: 50, 126, 105, 251, 105, 251, 105, 126, 55 % speed17
    fazyCyklu = [ 50, 126, 105, 251, 105, 251, 105, 126, 55 ];
    lbaPominietychProbek = 8;
case 1426 % fazy: 50, 168, 105, 335, 105, 335, 105, 168, 55 % speed16
    fazyCyklu = [ 50, 168, 105, 335, 105, 335, 105, 168, 55 ];
    lbaPominietychProbek = 10;
case 2430 % fazy: 50, 335, 105, 670, 105, 670, 105, 335, 55 % speed15
    fazyCyklu = [ 50, 335, 105, 670, 105, 670, 105, 335, 55 ];
    lbaPominietychProbek = 12;
case 4440 % fazy: 50, 670, 105, 1340, 105, 1340, 105, 670, 55 % speed14
    fazyCyklu = [ 50, 670, 105, 1340, 105, 1340, 105, 670, 55 ];
    lbaPominietychProbek = 14;
case 8444 % fazy: 50, 1338, 105, 2674, 105, 2674, 105, 1338, 55 % speed13
    fazyCyklu = [ 50, 1338, 105, 2674, 105, 2674, 105, 1338, 55 ];
    lbaPominietychProbek = 16;
case 16490 % fazy: 50, 2678, 105, 5357, 105, 5357, 105, 2678, 55 % speed12
    fazyCyklu = [ 50, 2678, 105, 5357, 105, 5357, 105, 2678, 55 ];
    lbaPominietychProbek = 18;
otherwise
    disp("Nieprawidłowa długość cyklu");
    return;
end

%początek fazy ruchu
poczatekFazy2 = fazyCyklu(1);
poczatekFazy4 = fazyCyklu(1) + fazyCyklu(2) + fazyCyklu(3);
poczatekFazy6 = fazyCyklu(1) + fazyCyklu(2) + fazyCyklu(3) + fazyCyklu(4) + fazyCyklu(5);
poczatekFazy8 = fazyCyklu(1) + fazyCyklu(2) + fazyCyklu(3) + fazyCyklu(4) + fazyCyklu(5) +
fazyCyklu(6) + fazyCyklu(7);

% Wybór kolumn C, D, O (indeksy 3, 4, 14, 15)
```

```

% i wierszy od drugiego (indeks 2) - prędkość kątowna
% selected_data = data(1:end, [15, 16, 14, 15, 16]);
% Zmiana nagłówków kolumn tabeli selected_data
selected_data.Properties.VariableNames = {'Wzorce', 'Pomiary', 'Moving', 'SampleNoCycle', 'Speed',
'SpeedAcc'};
% Tworzenie nowej tabeli z wybranymi danymi
SourceData = selected_data;

% Zakładamy, że kolumna z wzorcami nazywa się 'Wzorce', a kolumna z pomiarami 'Pomiary'
disp(SourceData.Properties.VariableNames);
% Wyświetlenie nowej tabeli
disp(SourceData);

%dane = SourceData;
SourceDataTMP = SourceData;
% Filtracja pomiarów pogrupowanych względem kąta -----
%warunek = (SourceDataTMP.Wzorce >= -200) & (SourceDataTMP.Wzorce <= 200) &
(SourceDataTMP.SampleNoCycle <= 50 | SourceDataTMP.SampleNoCycle >= 55) & ((SourceDataTMP.Moving
== 1 & SourceDataTMP.Speed ~= 0) | (SourceDataTMP.Moving == 0));
%warunek = (SourceDataTMP.SampleNoCycle < 50 | SourceDataTMP.SampleNoCycle > 54) &
( SourceDataTMP.SampleNoCycle < SamplesCykl - 60 | SourceDataTMP.SampleNoCycle > SamplesCykl -
56) & ((SourceDataTMP.Moving == 1 & SourceDataTMP.Speed ~= 0) | (SourceDataTMP.Moving == 0 &
SourceDataTMP.Speed == 0));
warunek = (SourceDataTMP.SampleNoCycle < poczatekFazy2 | SourceDataTMP.SampleNoCycle >
poczatekFazy2 + lbaPominietychProbek) & ...
(SourceDataTMP.SampleNoCycle < poczatekFazy4 |
SourceDataTMP.SampleNoCycle > poczatekFazy4 + lbaPominietychProbek) & ...
(SourceDataTMP.SampleNoCycle < poczatekFazy6 |
SourceDataTMP.SampleNoCycle > poczatekFazy6 + lbaPominietychProbek) & ...
(SourceDataTMP.SampleNoCycle < poczatekFazy8 |
SourceDataTMP.SampleNoCycle > poczatekFazy8 + lbaPominietychProbek) & ...
( SourceDataTMP.SampleNoCycle < SamplesCykl - 60 |
SourceDataTMP.SampleNoCycle > SamplesCykl - 56) & ...
( (SourceDataTMP.Moving == 1 & SourceDataTMP.Speed ~= 0) |
(SourceDataTMP.Moving == 0 & SourceDataTMP.Speed == 0));

```

Listing 3. Procedura filtracji

Następnie tak przygotowane dane pomiarowe posłużyły jako dane wejściowe do wyznaczenia kolejnej grupy wielomianów odwrotnych. Po ich wyznaczeniu dokonano nimi kolejnych estymacji. Wyniki analizy statystycznej przedstawiono w poniższych tabelach, pogrupowanych dla prędkości kątowych większych i mniejszych od zera.

Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path								
WZero	225,16	221,52	228,80	speed_20_100_MatlabNewAngleGroupAll_								
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2
Pomiar	1540,00	11,41	11,41	0,02	37,08	-22,74	6,68	-6,52	6,52	6,52	1,00	0,87
Estymacja	1540,00	17,93	17,93	0,02	43,83	-16,47	6,73	0,00	0,04	0,04	1,00	0,87
Poprawa [%]	0,00	-57,18	-57,18	-0,83	-18,21	27,59	-0,79	100,00	99,43	99,37	0,00	0,09
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path								
WZero	113,88	110,24	117,52	speed_19_100_MatlabNewAngleGroupAll_								
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2
Pomiar	4329,00	13,67	13,67	0,02	41,01	-31,58	16,66	-3,49	3,49	3,49	1,00	0,97
Estymacja	4329,00	17,16	17,16	0,02	44,70	-28,60	16,80	0,00	0,03	0,04	1,00	0,97
Poprawa [%]	0,00	-25,53	-25,53	-0,81	-9,00	9,44	-0,83	100,00	99,06	98,94	0,00	0,06
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path								
WZero	55,64	52,00	59,28	speed_18_100_MatlabNewAngleGroupAll_								
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2
Pomiar	9622,00	12,26	12,26	0,02	42,76	-37,10	43,00	-1,91	1,91	1,91	1,00	0,99
Estymacja	9622,00	14,17	14,17	0,02	44,95	-35,72	43,42	0,00	0,03	0,04	1,00	0,99
Poprawa [%]	0,00	-15,58	-15,58	-0,96	-5,12	3,72	-0,97	100,00	98,35	98,10	0,00	0,02
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path								
WZero	37,96	34,32	41,60	speed_17_100_MatlabNewAngleGroupAll_								
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2
Pomiar	14707,00	12,10	12,10	0,02	43,36	-39,01	47,10	-1,39	1,39	1,39	1,00	1,00
Estymacja	14707,00	13,50	13,50	0,02	45,06	-38,15	47,57	0,00	0,03	0,04	1,00	1,00
Poprawa [%]	0,00	-11,52	-11,52	-1,00	-3,92	2,21	-1,00	100,00	97,71	97,40	0,00	0,01
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path								
WZero	26,52	22,88	30,16	speed_16_100_MatlabNewAngleGroupAll_								
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2
Pomiar	20455,00	11,55	11,55	0,02	43,54	-39,89	63,39	-1,14	1,14	1,14	1,00	1,00
Estymacja	20455,00	12,69	12,69	0,02	44,98	-39,30	64,01	0,00	0,03	0,04	1,00	1,00
Poprawa [%]	0,00	-9,86	-9,86	-0,97	-3,30	1,48	-0,97	100,00	97,20	96,81	0,00	0,01
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path								
WZero	14,56	11,44	17,68	speed_15_100_MatlabNewAngleGroupAll_								
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2
Pomiar	23618,00	5,88	5,88	0,02	43,91	-42,19	70,82	-0,70	0,70	0,70	1,00	1,00
Estymacja	23618,00	6,59	6,59	0,02	44,99	-41,97	71,56	0,00	0,04	0,04	1,00	1,00
Poprawa [%]	0,00	-11,93	-11,93	-1,05	-2,46	0,52	-1,05	100,00	94,30	93,69	0,00	0,00
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path								
WZero	8,84	5,20	12,48	speed_14_100_MatlabNewAngleGroupAll_								
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2
Pomiar	81664,00	1,42	1,42	0,03	44,17	-43,29	225,12	-0,46	0,47	0,47	1,00	1,00
Estymacja	81664,00	1,89	1,89	0,03	45,06	-43,28	227,41	0,00	0,04	0,05	1,00	1,00
Poprawa [%]	0,00	-32,65	-32,64	-1,02	-2,02	0,02	-1,02	100,00	90,72	89,13	0,00	0,00
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path								
WZero	5,72	5,20	6,24	speed_13_100_MatlabNewAngleGroupAll_								
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2
Pomiar	55850,00	0,03	0,03	0,03	43,75	-43,54	117,20	-0,41	0,42	0,42	1,00	1,00
Estymacja	55850,00	0,44	0,44	0,03	44,61	-43,59	118,42	0,00	0,05	0,05	1,00	1,00
Poprawa [%]	0,00	-1349,00	-1334,96	-1,05	-1,96	-0,11	-1,04	100,00	89,20	87,45	0,00	0,00
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path								
WZero	5,72	5,20	6,24	speed_12_100_MatlabNewAngleGroupAll_								
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2
Pomiar	33805,00	-0,26	-0,26	0,05	43,80	-44,25	154,19	-0,29	0,35	0,36	1,00	1,00
Estymacja	33805,00	0,03	0,03	0,05	44,60	-44,58	156,05	0,00	0,12	0,13	1,00	1,00
Poprawa [%]	0,00	110,77	111,13	-1,21	-1,83	-0,74	-1,21	100,00	65,62	63,72	0,00	0,00

Tabela 18. Statystyki pomiarów i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości większych od zera – dodatkowa filtracja fazy rozruchowej.

Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-225,16	-228,80	-221,52	speed_20_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	1353,00	-10,93	-10,93	0,02	22,47	-37,33	5,74	6,29	6,29	6,29	1,00	0,87		
Estymacja	1353,00	-17,22	-17,22	0,02	16,51	-43,91	5,80	0,00	0,04	0,04	1,00	0,87		
Poprawa [%]	0,00	-57,54	-57,55	-1,09	26,51	-17,63	-1,05	100,00	99,36	99,29	0,00	0,35		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-113,88	-117,52	-110,24	speed_19_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	4118,00	-7,19	-7,19	0,02	31,51	-41,08	13,49	3,24	3,24	3,24	1,00	0,98		
Estymacja	4118,00	-10,43	-10,43	0,02	28,67	-44,70	13,63	0,00	0,03	0,03	1,00	0,98		
Poprawa [%]	0,00	-45,00	-45,00	-1,10	9,00	-8,81	-1,07	100,00	99,10	98,96	0,00	0,05		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-55,64	-59,28	-52,00	speed_18_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	9450,00	-8,14	-8,14	0,02	37,00	-42,90	29,70	1,71	1,71	1,71	1,00	0,99		
Estymacja	9450,00	-9,86	-9,86	0,02	35,78	-44,96	30,01	0,00	0,03	0,03	1,00	0,99		
Poprawa [%]	0,00	-21,02	-21,02	-1,04	3,30	-4,80	-1,05	100,00	98,28	98,02	0,00	0,01		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-37,96	-41,60	-34,32	speed_17_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	14449,00	-8,15	-8,15	0,02	38,89	-43,44	36,66	1,20	1,20	1,20	1,00	1,00		
Estymacja	14449,00	-9,35	-9,35	0,02	38,14	-45,01	37,04	0,00	0,03	0,03	1,00	1,00		
Poprawa [%]	0,00	-14,74	-14,73	-1,03	1,94	-3,61	-1,03	100,00	97,46	97,13	0,00	0,01		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-26,52	-30,16	-22,88	speed_16_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	20217,00	-6,75	-6,75	0,02	39,69	-43,55	56,91	0,93	0,93	0,93	1,00	1,00		
Estymacja	20217,00	-7,68	-7,68	0,02	39,25	-44,87	57,52	0,00	0,03	0,04	1,00	1,00		
Poprawa [%]	0,00	-13,73	-13,72	-1,08	1,10	-3,04	-1,08	100,00	96,36	95,85	0,00	0,00		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-14,56	-17,68	-11,44	speed_15_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	23998,00	-5,59	-5,59	0,02	42,01	-43,99	73,74	0,52	0,52	0,52	1,00	1,00		
Estymacja	23998,00	-6,11	-6,11	0,02	41,95	-44,94	74,57	0,00	0,04	0,04	1,00	1,00		
Poprawa [%]	0,00	-9,25	-9,25	-1,13	0,13	-2,15	-1,12	100,00	92,30	91,43	0,00	0,00		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-8,84	-12,48	-5,20	speed_14_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	82046,00	-1,59	-1,59	0,03	43,14	-44,24	208,36	0,26	0,32	0,32	1,00	1,00		
Estymacja	82046,00	-1,86	-1,86	0,03	43,31	-45,00	210,59	0,00	0,04	0,05	1,00	1,00		
Poprawa [%]	0,00	-16,40	-16,39	-1,09	-0,40	-1,72	-1,07	100,00	86,81	84,69	0,00	0,00		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-5,72	-6,24	-5,20	speed_13_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	55752,00	-0,28	-0,28	0,03	43,74	-43,98	115,18	0,10	0,27	0,27	1,00	1,00		
Estymacja	55752,00	-0,38	-0,38	0,03	44,07	-44,60	116,42	0,00	0,04	0,05	1,00	1,00		
Poprawa [%]	0,00	-36,96	-36,95	-1,08	-0,75	-1,40	-1,07	100,00	84,02	81,39	0,00	0,00		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-5,72	-6,24	-5,20	speed_12_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	33867,00	0,11	0,11	0,05	44,21	-43,84	147,04	0,14	0,30	0,30	1,00	1,00		
Estymacja	33867,00	-0,03	-0,03	0,05	44,59	-44,60	148,86	0,00	0,12	0,13	1,00	1,00		
Poprawa [%]	0,00	124,98	126,44	-1,24	-0,87	-1,73	-1,24	100,00	59,70	57,73	0,00	0,00		

Tabela 19. Statystyki pomiarów i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości większych od zera – dodatkowa filtracja fazy rozruchowej.

Dla danych obejmujących grupy zarejestrowanych pomiarów przefiltrowanych procedurą filtracji MAE wartości pomiarowych także rośnie z prędkością kątową i wynosi: od 0,35 do 6,52° (WZero) (Tabela 18) oraz od 0,27 do 6,29° (MZero) (Tabela 19). Jednocześnie zawęża się zakres prędkości, przykładowo dla najwyższej prędkości kierunku WZero z [69,68°/s, 228,80°/s] (wszystkie grupy) (Tabela 5) do [221,52°/s, 228,80°/s] (grupy przefiltrowane) (Tabela 19). Jako prędkość wzorcową dla danego wielomianu odwrotnego wybierana jest wartość WarSrSpeed. Wyznaczone wielomiany odwrotne równie skutecznie działają dla danej prędkości kątowej. W zależności od prędkości kątowej poprawa wartości MAE estymacji: dla kierunku WZero wynosi od 65,62% do 99,43%, dla kierunku MZero od 59,70% do 99,29% i jest wyższa niż dla wielomianów odwrotnych wyznaczonych przed filtracją. Dla pomiarów w fazie ruchu wartość poprawy MAE także rośnie wraz z prędkością kątową.

Nr	Prędkość kątowna [°/s]	Id zbioru danych	Wszystkie próbki (WZero)			Grupy co najmniej 200 próbek (WZero)			Filtracja (WZero)		
			MAE pomiar [°]	MAE estymacja [°]	Poprawa [%]	MAE pomiar [°]	MAE estymacja [°]	Poprawa [%]	MAE pomiar [°]	MAE estymacja [°]	Poprawa [%]
1.	1,76	12							0,35	0,12	65,62
2.	3,52	13	0,42	0,05	88,62	0,41	0,05	88,66	0,42	0,05	89,02
3.	7,031	14	0,46	0,05	89,97	0,46	0,05	89,87	0,47	0,04	90,72
4.	14,06	15	0,68	0,04	94,29	0,69	0,04	94,47	0,70	0,04	94,30
5.	28,12	16	1,12	0,04	96,69	1,13	0,03	97,02	1,14	0,03	97,20
6.	37,50	17	1,38	0,04	97,07	1,39	0,04	97,41	1,39	0,03	97,71
7.	56,25	18	1,88	0,04	97,65	1,89	0,04	98,06	1,91	0,03	98,35
8.	112,50	19	3,40	0,08	97,70	3,44	0,04	98,73	3,49	0,03	99,06
9.	225,00	20	6,31	0,24	96,24	6,40	0,10	98,43	6,52	0,04	99,43

Tabela 20. Wartości MAE pomiarów, MAE estymacji regresją wielomianową oraz stopień poprawy danych pomiarowych – dla kierunku WZero.

Nr	Prędkość kątowna [°/s]	Id zbioru danych	Wszystkie próbki (MZero)			Grupy co najmniej 200 próbek (MZero)			Filtracja (MZero)		
			MAE pomiar [°]	MAE estymacja [°]	Poprawa [%]	MAE pomiar [°]	MAE estymacja [°]	Poprawa [%]	MAE pomiar [°]	MAE estymacja [°]	Poprawa [%]
1.	-1,76	12							0,30	0,12	59,70
2.	-3,52	13	0,27	0,05	83,22	0,27	0,05	83,14	0,27	0,04	84,02
3.	-7,031	14	0,32	0,05	86,06	0,32	0,05	86,06	0,32	0,04	86,81
4.	-14,06	15	0,51	0,04	92,42	0,52	0,04	92,60	0,52	0,04	92,30
5.	-28,12	16	0,90	0,04	95,92	0,91	0,03	96,20	0,93	0,03	96,36
6.	-37,50	17	1,19	0,04	96,91	1,20	0,03	97,21	1,20	0,03	97,46
7.	-56,25	18	1,69	0,04	97,55	1,69	0,04	97,59	1,71	0,03	98,28
8.	-112,50	19	3,17	0,07	97,85	3,17	0,07	97,85	3,24	0,03	99,10
9.	-225,00	20	6,09	0,15	97,46	6,11	0,15	97,50	6,29	0,04	99,36

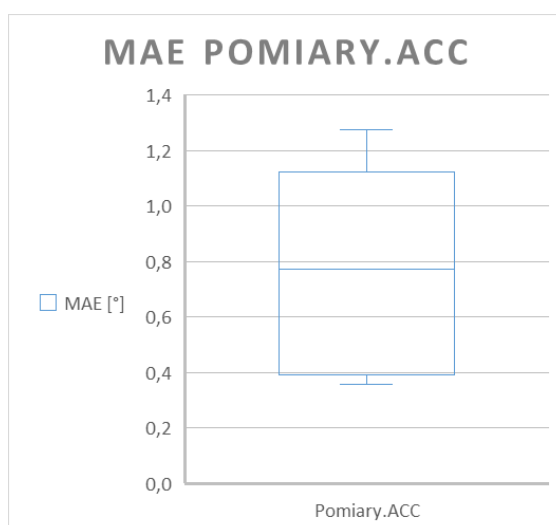
Tabela 21. Wartości MAE pomiarów, MAE estymacji regresją wielomianową oraz stopień poprawy danych pomiarowych – dla kierunku MZero.

Z powyższej tabeli wynika, że najlepsze wyniki estymacji uzyskano, dla grup wielomianów odwrotnych wyznaczonych na podstawie danych pomiarowych przefiltrowanych, dlatego te grupy wielomianów zostały wybrane do dalszych eksperymentów.

Dokonano także oceny pomiarów kąta na bazie akcelerometru zarejestrowanych dla poszczególnych prędkości kątowych bez uwzględniania fazy ruchu. Oceniany zbiór pomiarów oznaczony jako Pomiary.ACC był podstawą estymacji wszystkich opisanych w tym rozdziale modeli.

Metoda pomiaru	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE [°]	RMSE [°]	R2	Id zbioru
Pomiary.ACC	80163	7,844	13,960	26,096	44,520	-44,480	-0,162	0,35820	0,18647	0,43182	0,99973	12
	132406	7,725	13,800	25,958	44,430	-44,610	-0,237	0,38256	0,20978	0,45802	0,99970	13
	184540	7,677	11,710	25,916	44,500	-44,590	-0,187	0,39689	0,23658	0,48639	0,99966	14
	68419	7,545	7,870	27,049	44,490	-44,550	-0,161	0,50701	0,33890	0,58215	0,99955	15
	61472	8,529	12,045	28,877	44,500	-44,560	-0,164	0,77397	0,74371	0,86239	0,99913	16
	50021	8,542	10,660	29,622	44,540	-44,550	-0,159	0,88768	1,01365	1,00680	0,99888	17
	39874	9,082	11,310	31,050	44,670	-44,670	-0,160	1,05063	1,59778	1,26403	0,99839	18
	29247	9,751	11,180	33,284	44,540	-44,600	-0,182	1,27540	3,38516	1,83988	0,99705	19
	23693	10,288	5,370	35,265	44,800	-44,560	-0,205	1,19265	5,31739	2,30595	0,99589	20

Tabela 22. Statystyki pomiarów kąta na bazie akcelerometru



Rys. 25. Wykres błędu MAE pomiarów kąta na bazie akcelerometru

3.3.1.3 Metoda wyznaczenia wielomianu odwrotnego z uwzględnieniem prędkości kątowej

Polega na regresji na bazie współczynników wielomianów odwrotnych. W badaniach wykorzystano skrypt MATLAB służący do interpolacji parametrów wielomianów opisujących zależność kąta od prędkości kątowej oraz do estymacji wartości kątów na podstawie danych pomiarowych. Główne zadania skryptu to: dopasowanie modeli, ocena ich dokładności oraz analiza błędów. Skrypt wykorzystuje wyznaczone w poprzednich etapach wielomiany odwrotne z danych przefiltrowanych (macierz A). Umożliwia stworzenie dynamicznych modeli

estymujących kąty w funkcji prędkości na podstawie danych pomiarowych oraz ocenę ich dokładności w różnych zakresach prędkości.

```
A = [
225.16, 8, 0.999995386, 6.62737E-14, 4.20702E-12, 8.73639E-10, -5.7153E-08, -2.64278E-07, 3.35635E-05, -6.7245E-06, 1.006002071, 6.41943333;
113.88, 8, 0.999996924, -4.58675E-14, -2.98185E-12, 1.08758E-10, 1.00908E-08, -1.56654E-07, -9.32325E-06, 8.95864E-05, 1.013424637, 3.337539581;
55.64, 8, 0.999997801, 5.55425E-14, -2.93362E-12, -1.39321E-10, 8.46882E-09, 7.1409E-08, -8.4573E-06, 2.03487E-05, 1.013806456, 1.771894434;
37.96, 8, 0.99999773, 6.27139E-14, -2.72042E-12, -1.38441E-10, 7.26584E-09, 4.13664E-08, -6.94657E-06, 4.44124E-05, 1.013582798, 1.251801204;
26.52, 8, 0.999997854, 4.73212E-14, -3.06916E-12, -9.36592E-11, 8.78391E-09, -1.24688E-08, -8.35257E-06, 6.91992E-05, 1.013852237, 1.001229706;
14.56, 8, 0.999995583, 3.3482E-14, -2.40346E-12, -5.37871E-11, 7.06128E-09, -3.85941E-08, -7.26407E-06, 5.84602E-05, 1.014147259, 0.629544923;
8.84, 8, 0.999996915, 9.74382E-15, -1.00193E-12, -8.71105E-13, 3.21554E-09, -6.26222E-08, -4.31303E-06, 5.73449E-05, 1.013531537, 0.444677428;
5.72, 8, 0.999996438, -2.75213E-14, -5.39658E-13, 1.43322E-10, 1.99846E-09, -2.4035E-07, -3.23203E-06, 0.00012931, 1.013018633, 0.401258324;
3.51, 8, 0.999970532, -7.63642E-14, 2.45981E-12, 3.0838E-10, -5.79215E-09, -4.20069E-07, 2.01871E-06, 0.000198726, 1.012661286, 0.273046184; %
-3.51, 8, 0.999971091, -8.96222E-14, 2.53818E-12, 3.52265E-10, -6.15934E-09, -4.63264E-07, 2.45954E-06, 0.000206922, 1.012921178, -0.154689134;
-5.72, 8, 0.999996857, -7.04416E-14, -3.59695E-13, 2.78268E-10, 1.57825E-09, -3.69083E-07, -3.0887E-06, 0.000165487, 1.013407339, -0.111591024;
-8.84, 8, 0.999997042, -6.0206E-14, -1.13123E-12, 2.33694E-10, 3.78473E-09, -3.13962E-07, -5.00464E-06, 0.000143498, 1.014082957, -0.25010322;
-14.56, 8, 0.999995879, -9.80207E-14, -2.79708E-12, 3.36056E-10, 8.25823E-09, -3.82211E-07, -8.25144E-06, 0.000149596, 1.014551061, -0.460206147;
-26.52, 8, 0.999997651, -8.47373E-14, -2.90843E-12, 3.01168E-10, 8.4526E-09, -3.62005E-07, -8.16264E-06, 0.000147867, 1.014132881, -0.858209138;
-37.96, 8, 0.999998034, -1.31961E-13, -5.71303E-12, 3.91962E-10, 1.48329E-08, -4.15333E-07, -1.24811E-05, 0.000170633, 1.014896369, -1.122222905;
-55.64, 8, 0.99999833, -3.79411E-14, -2.05334E-12, 1.97281E-10, 6.81951E-09, -3.18102E-07, -7.61671E-06, 0.000164858, 1.014047579, -1.634864802;
-113.88, 8, 0.999998163, -1.11021E-13, -5.54372E-12, 2.41594E-10, 1.13604E-08, -2.62587E-07, -9.10554E-06, 0.000125757, 1.013960781, -3.167312271;
-225.16, 8, 0.999993671, 5.38053E-13, 5.86622E-11, 1.10926E-09, -5.25868E-08, -1.62283E-06, 8.95301E-06, 0.000537624, 1.011184437, -6.213209665;
];

% Wyciąganie kolumn z danymi
WarSrSpeed = A(:, 1);
RWparamTMP = A(:, 4:end);
%display(RWparamTMP);

% Interpolacja Splinowa dla każdego parametru
RWparam = 101el(1, size(RWparamTMP, 2));
for I = 1:size(RWparamTMP, 2)
    RWparam{i} = spline(WarSrSpeed, RWparamTMP(:, i));
end

% Estymacja wielomianów - dla całego zbioru danych
for j = 1:size(DataESTm, 1)
    WarSpeed = DataESTm.Speed(j);
    % Obliczanie wartości parametrów dla przykładowej prędkości kątowej
    RWparamSpeed = cellfun(@(pp) ppval(pp, WarSpeed), RWparam); %dla całego zbioru danych
    % Tworzenie wielomianu 8 stopnia na podstawie parametrów
    POM = DataESTm.Pomiary(j); %Pomiary(i));
    DataESTm.EstRegWiel(j) = polyval([RWparamSpeed], POM); %dla całego zbioru danych
end
```

Listing 4. Skrypt wyznaczający wielomiany odwrotne z uwzględnieniem prędkości kątowej – model EstRegWiel

Model regresji wielomianowej z uwzględnieniem prędkości kątowej nazwano EstRegWiel. Jak można się spodziewać wyniki estymacji globalnie będą gorsze niż przy zastosowaniu wielomianu odwrotnego dedykowanego jednej prędkości kątowej, jednak metoda ta pozwala wyznaczyć wielomian dla różnych prędkości kątowych. Metoda wymaga wyznaczenia wielomianów odwrotnych dla większej liczby prędkości kątowych (z zawężonym zakresem prędkości min-max).

Efekty działania wszystkich modeli, w tym EstRegWiel, omówionych w tym rozdziale są przedstawione w podsumowaniu wyników estymacji (patrz rozdział 3.4).

3.3.2 Badania regresji z wykorzystaniem modeli RF, MLP i K-NNN

Przygotowano skrypty w języku Python z wykorzystaniem biblioteki sklearn odpowiedzialne za skalowanie danych, trening modelu, zapis modelu i skalera, wczytujący dane testowe, dokonujące predykcji i oceny skuteczności.

Random Forest (RF) Regressor

Model tworzony jest z wykorzystaniem:

- modułu *joblib* – zapisywania i wczytywania modeli,
- *RandomForestRegressor* – algorytm regresji oparty na losowym lesie,
- *mean_squared_error*, *mean_absolute_error*, *r2_score* – metryk oceny jakości modelu.

Skrypt tworzy model regresji lasu losowego z 100 drzewami (*n_estimators=100*) i ustalonym *random_state* dla powtarzalności wyników. Trenuje model na zbiorze treningowym *X_train* i *y_train*. Model jest zapisywany do pliku *rf_model.joblib*, co umożliwia późniejsze użycie bez ponownego trenowania. Następnie wcześniej zapisany modelu wczytywany jest z pliku, by dokonać predykcji dla danych testowych *X_test* i wyznaczyć metryki jakości modelu: średni błąd bezwzględny, średni błąd kwadratowy oraz miarę dopasowania.

```
import joblib
from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
from sklearn.metrics import mean_squared_error, r2_score

# Wytrenowanie modelu regresji lasu losowego
rf_model = RandomForestRegressor(n_estimators=100, random_state=42)
rf_model.fit(X_train, y_train)

# Zapisz model do pliku
filename = 'rf_model.joblib'
joblib.dump(rf_model, filename)

# Wczytaj model z pliku
rf_model = joblib.load(filename)

# Dokonanie predykcji
rf_y_pred = rf_model.predict(X_test)

# Wyświetlenie metryk
print(f'Model: {rf_model}')
print("Mean Absolute Error:", mean_absolute_error(y_test, rf_y_pred))
print("Mean Squared Error:", mean_squared_error(y_test, rf_y_pred))
print("R² Score:", r2_score(y_test, rf_y_pred))
```

Listing 5. Skrypt modelu lasu losowego – trenowanie i predykcja

Multi-Layer Perceptron (MLP) Regressor

Model tworzony jest z wykorzystaniem:

- modułu *joblib* – zapisywania i wczytywania modeli (w tym skalowników),
- *MLPRegressor* – algorytm regresji oparty na modelu sieci neuronowej do zadań regresyjnych,
- *StandardScaler* – narzędzie standaryzacji danych wejściowych dla algorytmów uczenia maszynowego opartych na obliczaniu odległości,
- *mean_squared_error*, *mean_absolute_error*, *r2_score* – metryk oceny jakości modelu.

Skrypt tworzy model MLP z dwoma warstwami ukrytymi (64 i 32 neurony) z maksymalną liczbą iteracji równą tysiąc i ziarnem losowości zapewniającym powtarzalność tworzenia modeli. Trenuje model na zbiorze treningowym X_{train} i y_{train} . Model jest zapisywany do pliku *mlp_model.joblib*, co umożliwi późniejsze użycie bez ponownego trenowania. Następnie wcześniejszy zapisany model wczytywany jest z pliku, by dokonać predykcji dla danych testowych X_{test} i wyznaczyć metryki jakości modelu: średni błąd bezwzględny, średni błąd kwadratowy oraz miarę dopasowania.

```
import joblib
from sklearn.neural_network import MLPRegressor
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
from sklearn.metrics import mean_absolute_error, mean_squared_error, r2_score

# Skalowanie cech wejściowych
scaler = StandardScaler()
X_train_scaled = scaler.fit_transform(X_train)
X_test_scaled = scaler.transform(X_test)

# Wytrenowanie modelu regresji
mlp_model = MLPRegressor(hidden_layer_sizes=(64, 32), max_iter=1000, random_state=42)
mlp_model.fit(X_train_scaled, y_train)

# Zapisz model do pliku
filename = 'mlp_model.joblib'
joblib.dump(mlp_model, filename)
# Jeśli chcesz również zapisać skalownik
scaler_filename = 'mlp_model_scaler.joblib'
joblib.dump(scaler, scaler_filename)

# Wczytaj model z pliku
mlp_model = joblib.load(filename)
# Jeśli wcześniej zapisałeś skalownik
scaler_loaded = joblib.load(scaler_filename)

# Dokonanie predykcji
```

```

mlp_y_pred = mlp_model.predict(X_test_scaled)

print(f'Model: {mlp_model}')
print("Mean Absolute Error:", mean_absolute_error(y_test, mlp_y_pred))
print("Mean Squared Error:", mean_squared_error(y_test, mlp_y_pred))
print("R² Score:", r2_score(y_test, mlp_y_pred))

```

Listing 6. Skrypt modelu regresji MLP – trenowanie i predykcja

K-Nearest Neighbors (KNN) Regressor

Model tworzony jest z wykorzystaniem:

- modułu *joblib* – zapisywania i wczytywania modeli,
- *KNeighborsRegressor* – implementacja regresji metodą k-najbliższych sąsiadów,
- *mean_squared_error*, *mean_absolute_error*, *r2_score* – metryk oceny jakości modelu.

Skrypt tworzy model regresji, który do przewidywania wartości wykorzystuje 3 najbliższych sąsiadów (czyli 3 próbki treningowe, które są najbliżej danej próbki testowej w przestrzeni cech). Trenuje model na zbiorze treningowym X_{train} i y_{train} . Model jest zapisywany do pliku *knn_model.joblib*, co umożliwia późniejsze użycie bez ponownego trenowania. Następnie wcześniej zapisany modelu wczytywany jest z pliku, by dokonać predykcji dla danych testowych X_{test} i wyznaczyć metryki jakości modelu: średni błąd bezwzględny, średni błąd kwadratowy oraz miarę dopasowania.

```

import joblib
from sklearn.neighbors import KNeighborsRegressor
from sklearn.metrics import mean_squared_error, r2_score

# Wytrenowanie modelu regresji KNN
knn_model = KNeighborsRegressor(n_neighbors=3)
knn_model.fit(X_train, y_train)

# Zapisz model do pliku
filename = 'knn_model.joblib'
joblib.dump(knn_model, filename)

# Wczytaj model z pliku
knn_model = joblib.load(filename)

knn_y_pred = knn_model.predict(X_test)

# Wyświetlenie metryk
print(f'Model: {knn_model}')
print("Mean Absolute Error:", mean_absolute_error(y_test, knn_y_pred))
print("Mean Squared Error:", mean_squared_error(y_test, knn_y_pred))
print("R² Score:", r2_score(y_test, knn_y_pred))

```

Listing 7. Skrypt modelu regresji K najbliższych sąsiadów – trenowanie i predykcja

Za pomocą powyższych skryptów przygotowano modele dla danych treningowych obejmujących pomiary ze stanowiska 1 dla pełnego zakresu prędkości kątowych dla kierunku MZero i WZero.

Model	MSE [°]	MAE [°]	R2	Best Parameters Found
RandomForest	0.006767	0.051969	0.999988	max_depth: 20 min_samples_leaf: 1 min_samples_split: 10 n_estimators: 300
KNN	0.019032	0.064856	0.999966	algorithm: auto n_neighbors: 6 weights: distance
MLP	0.013303	0.088711	0.999976	activation: relu alpha: 0.001 hidden_layer_sizes: (30, 50, 10) learning_rate: constant solver: adam

Tabela 23. Statystyki modeli RF, KNN i MLP dla kierunku WZero oraz ich parametry

Model	MSE [°]	MAE [°]	R2	Best Parameters Found
RandomForest	0.006468	0.054743	0.999988	max_depth: 20 min_samples_leaf: 1 min_samples_split: 10 n_estimators: 300
KNN	0.012157	0.063829	0.999978	algorithm: auto n_neighbors: 4 weights: distance
MLP	0.0125017	0.088505	0.999978	activation: relu alpha: 0.001 hidden_layer_sizes: (25, 10, 25) learning_rate: constant solver: adam

Tabela 24. Statystyki modeli RF, KNN i MLP dla kierunku MZero oraz ich parametry

Najlepsze wyniki dla kierunku WZero (Tabela 23) uzyskał model RF (MSE=0.006767°, MAE=0.051969°), osiągając najniższy poziom błędów zarówno w ujęciu średniokwadratowym, jak i bezwzględny. Dla kierunku MZero (Tabela 24) najniższe wartości błędów także uzyskał model RF (MSE = 0.006468°, MAE = 0.054743°).

3.4 Wyniki estymacji modeli dla danych surowych z akcelerometru

Przeprowadzono estymację zestawu modeli wyznaczonych z wykorzystaniem danych pomiarowych uzyskanych na testowym stanowisku pomiaru kąta opisanym w rozdziale 3.1.

Podstawą estymacji był zbiór danych pomiarowych kąta wyznaczonego na bazie akcelerometru oznaczony jako Pomiary.ACC – opisany w 3.3.1.2 i tabeli Tabela 22.

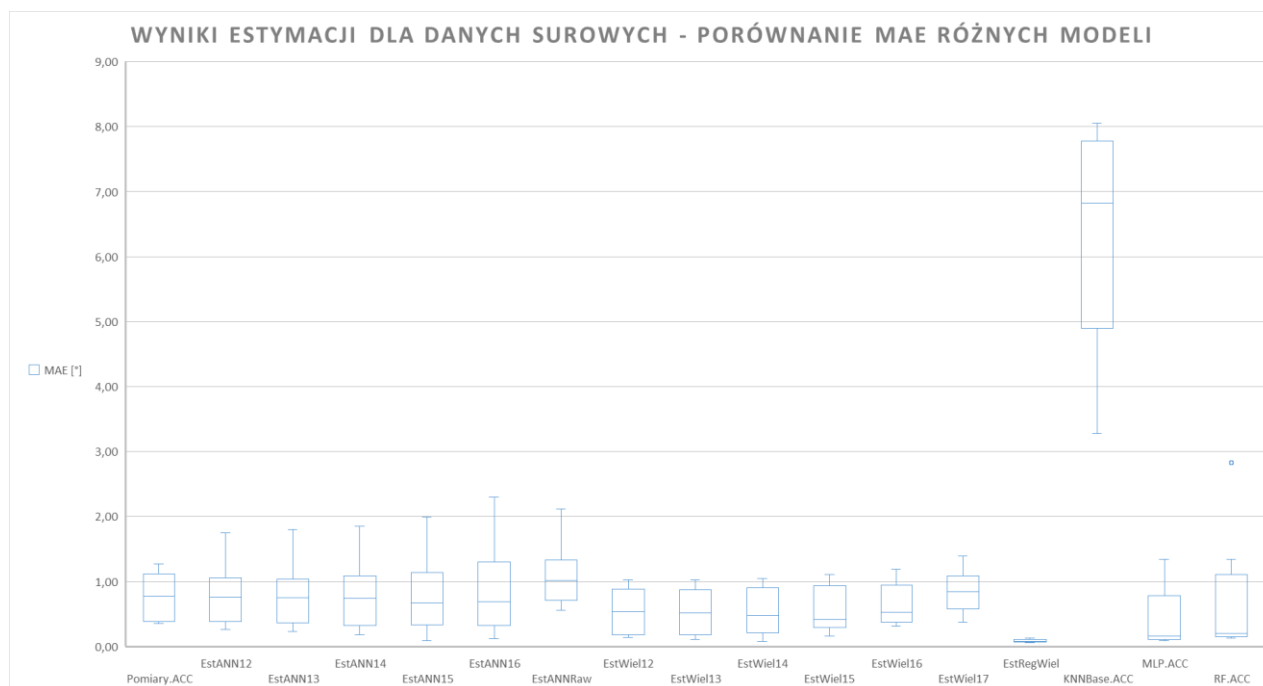
Modele wchodzące w skład zestawu tworzą następujące grupy :

- modele regresji wielomianowej stworzone w oparciu o pomiary kąta wyznaczonego na podstawie danych z akcelerometru odpowiadających poszczególnym prędkościom kątowym – modele EstWiel12 do EstWiel17 (patrz rozdział 3.2.2),

- modele regresji sieci neuronowych stworzone w oparciu o pomiary kąta wyznaczonego na podstawie danych z akcelerometru odpowiadających poszczególnym prędkościom kątowym – modele EstANN12 do EstANN16 (patrz rozdział 3.2.3),
- model regresji sieci neuronowych stworzony w oparciu o pomiary kąta wyznaczonego na podstawie zbiorczych danych z akcelerometru obejmujących cały zakres badanych prędkości kątowych – model EstANNRaw (patrz rozdział 3.2.3),
- model regresji wielomianowej stworzony w oparciu o pomiary kąta wyznaczonego na podstawie danych z akcelerometru oraz o wartości prędkości kątowej – model EstRegWiel (patrz rozdział 3.3.1.3),
- modele regresji MultiLayerPerceptron, RandomForest oraz K-Nearest Neighbors stworzone w oparciu o pomiary kąta wyznaczonego na podstawie danych z akcelerometru oraz o wartości prędkości kątowej – MLP.ACC, KNNBase.ACC oraz RF.ACC (patrz rozdział 3.3.2).

Wyniki estymacji poszczególnych modeli dla danych surowych z akcelerometru przedstawiono w tabeli Tabela 89. Ze względu na rozmiar tabeli została ona umieszczona w sekcji z załącznikami.

Zbiorcze porównanie MAE wszystkich modeli przedstawiono na poniższym wykresie typu ramka-wąsy (ang. box-and-whisker plot). Ten typ wykresu będzie używany w dalszej części tego rozdziału przy prezentacji wyników estymacji.

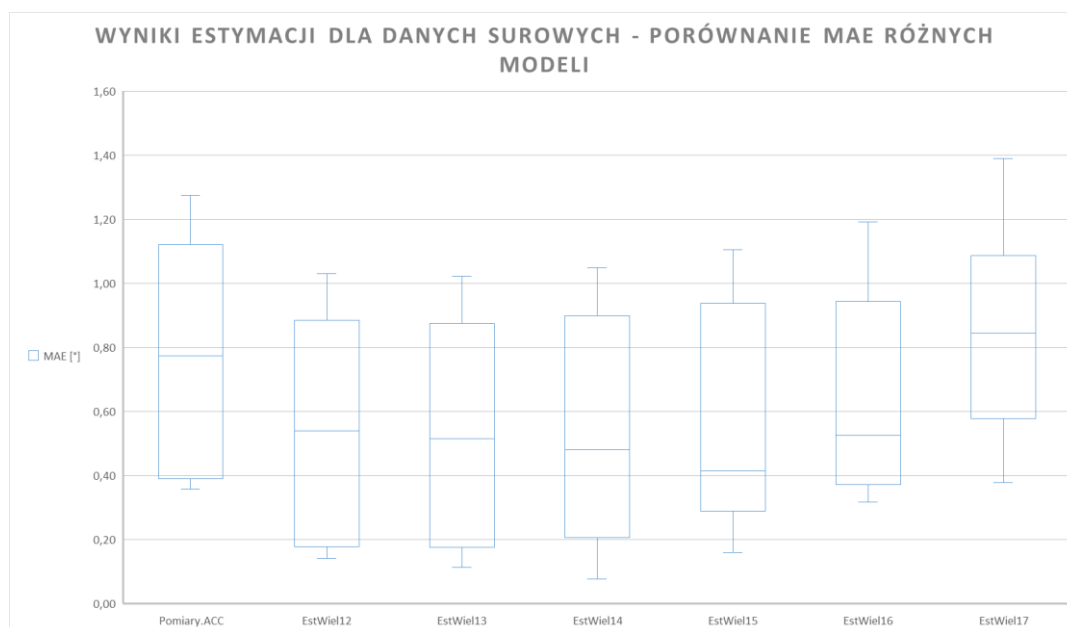


Rys. 26. Wykres błędów MAE estymacji modeli dla danych surowych

Najdokładniejszy i najbardziej stabilny model to EstRegWiel (średnia $\approx 0,09^\circ$, mediana $\approx 0,08^\circ$, odchylenie std $\approx 0,025^\circ$, zakres $0,056\text{--}0,128^\circ$). Model MLP.ACC charakteryzuje się dużą zmiennością: część wyników bardzo dobrych, część słabych (średnia $\approx 0,45^\circ$, mediana $\approx 0,16^\circ$, std $\approx 0,45^\circ$, zakres $0,089\text{--}1,345^\circ$). Najgorszy wynik w całym zestawieniu uzyskał model KNNBase.ACC (średnia $\approx 6,35^\circ$, mediana $\approx 6,82^\circ$, std $\approx 1,69^\circ$, zakres $3,28\text{--}8,05^\circ$).

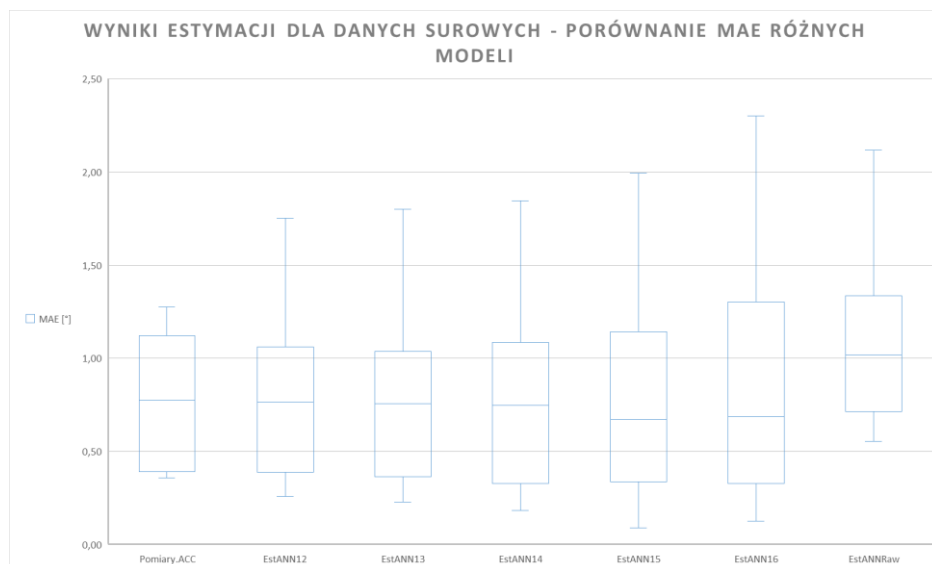
Poniżej zostaną zaprezentowane wyniki MAE dla poszczególnych grup modeli.

Modele odpowiadające poszczególnym prędkościom kątowym na bazie regresji wielomianowej (EstWiel12-EstWiel17) najmniejsze MAE estymacji osiągnęły w zbiorach z wartościami pomiarów dla prędkości modelowych. Modele regresji wielomianowej na bazie kąta od EstWiel12 do EstWiel16 skutecznie obniżają wartości błędów pomiarowych w pełnym zakresie prędkości kątowych. Estymacja modelem EstWiel17 charakteryzuje się już większymi błędami MAE od błędów MAE źródłowych danych pomiarowych.



Rys. 27. Wykres błędów MAE estymacji modeli z grupy EstWiel dla danych surowych

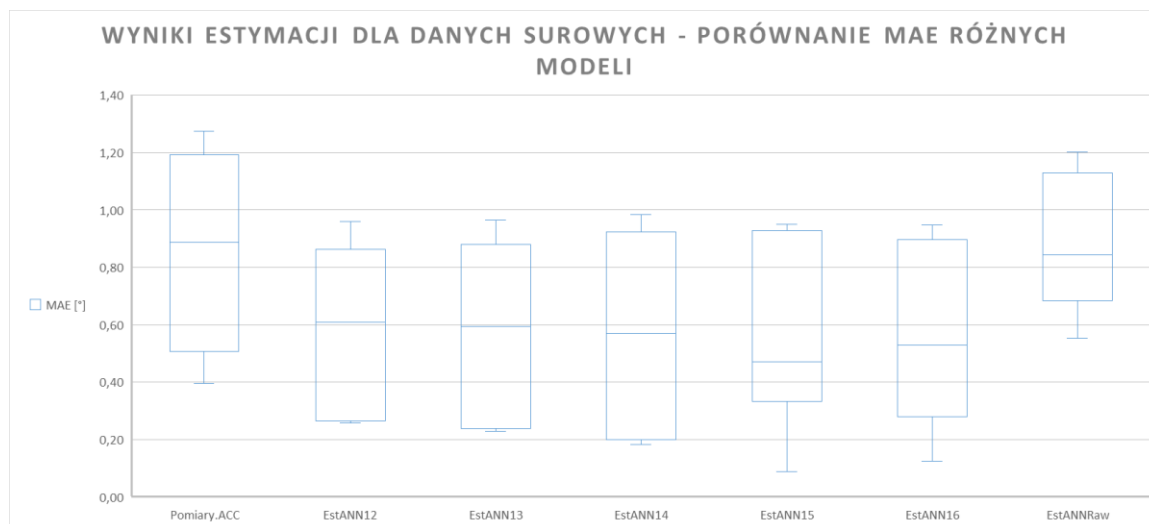
Modele na bazie sieci neuronowych nie obniżają błędów pomiarowych w pełnym zakresie prędkości.



Rys. 28. Wykres błędów MAE estymacji modeli z grupy EstANN dla danych surowych

Spośród modeli na bazie sieci neuronowych najlepszy okazał się model EstANN12 (średnia MAE $\approx 0,79^\circ$, mediana $\approx 0,76^\circ$, odchylenie std $\approx 0,47^\circ$, zakres $0,26\text{--}1,75^\circ$). Osiągnął wyniki stosunkowo stabilne, ale nieco gorsze niż najlepsze modele EstWiel. Najsłabszy wariant z rodziny EstANN to model EstANNRaw (średnia MAE $\approx 1,08^\circ$, mediana $\approx 1,02^\circ$, std $\approx 0,48^\circ$, zakres $0,55\text{--}2,12^\circ$), wypada wyraźnie gorzej niż trenowane EstANN12–16.

Natomiast zauważono, że skutecznie obniżają błędy pomiarowe dla prędkości większych od tych zawartych w zbiorach 12 i 13 – co widać na poniższym wykresie porównawczym.

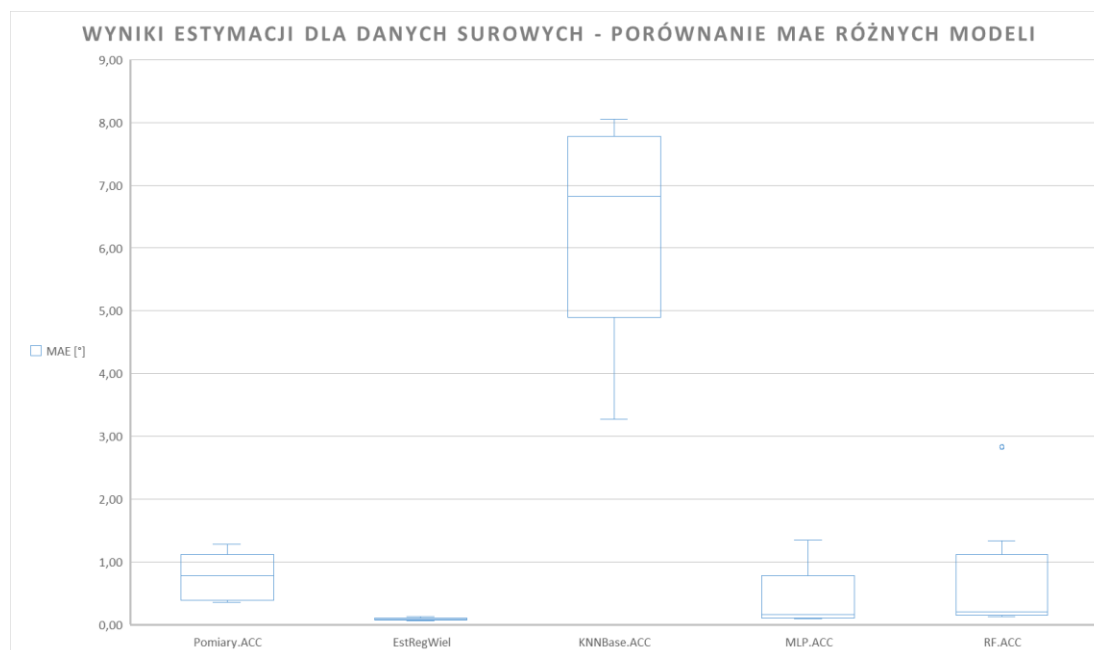


Rys. 29. Wykres błędów MAE estymacji modeli z grupy EstANN dla danych surowych – dla wyższych prędkości kątowych

Wszystkie modele EstANN (12–16) wypadają lepiej niż Pomiary.ACC – średni błąd jest niższy o ok. $0,15\text{--}0,22^\circ$. Najlepsze modele to EstANN15 (średnia MAE $\approx 0,54^\circ$, mediana $\approx 0,47^\circ$, zakres $0,09\text{--}0,95^\circ$, std $\approx 0,32$) i EstANN16 (średnia $\approx 0,55^\circ$, mediana $\approx 0,53^\circ$, zakres $0,12\text{--}0,95^\circ$, std $\approx 0,310$), które mają zarówno najniższą średnią, jak i medianę MAE. Pomiary.ACC (średnia

MAE $\approx 0,76^\circ$, mediana $\approx 0,77^\circ$, zakres $0,36\text{--}1,28^\circ$, std $\approx 0,36$) nie tylko mają wyższy średni MAE, ale też szerszy zakres i większą liczbę wartości powyżej 1° . Wykluczenie niskich IdSpeed (12 i 13) dodatkowo uwypukla przewagę EstANN – różnice względem pomiarów stają się bardziej wyraźne.

W grupie modeli uwzględniających prędkość kątową porównanie MAE przedstawia się następująco.



Rys. 30. Wykres błędów MAE estymacji dla danych surowych modeli uwzględniających prędkość kątową

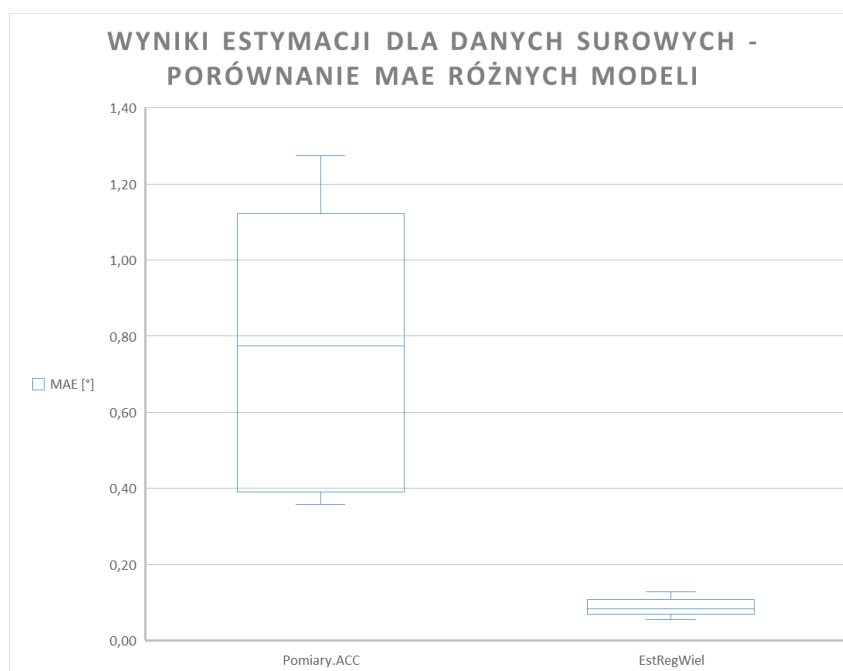
Zdecydowanie najlepszy model w całym zestawieniu to EstRegWiel (średnia MAE $\approx 0,09^\circ$, mediana $\approx 0,08^\circ$, odchylenie std $\approx 0,025^\circ$, zakres: $0,06\text{--}0,13^\circ$). Charakteryzuje się bardzo niskimi błędami i osiągnął niezwykle stabilne wyniki. Zdecydowanie przewyższa pomiary: średni błąd jest prawie 10 razy niższy, a rozrzut minimalny.

Najgorszy model to KNNBase.ACC (średnia MAE $\approx 6,35^\circ$, mediana $\approx 6,82^\circ$, odchylenie std $\approx 1,69^\circ$, zakres: $3,28\text{--}8,05^\circ$). Potencjalnie dobry model to MLP.ACC (średnia MAE $\approx 0,45^\circ$, mediana $\approx 0,16^\circ$, odchylenie std $\approx 0,45^\circ$, zakres: $0,09\text{--}1,35^\circ$) – mediana wskazuje na częste bardzo dobre wyniki, jednak duży rozrzut i wysokie wartości maksymalne obniżają stabilność.

Model RF.ACC (średnia MAE $\approx 0,75^\circ$, mediana $\approx 0,20^\circ$, odchylenie std $\approx 0,90^\circ$, zakres: $0,13\text{--}2,83^\circ$) jest niestabilny. Czasami daje dobre wyniki (niska mediana), ale bardzo często pojawiają się duże błędy, co powoduje wysoką średnią i szeroki zakres.

Jak widać z wyjątkiem modelu KNNBase.Acc pozostałe modele skutecznie poprawiają wartość MAE w porównaniu do surowych danych pomiarowych. Model regresji wielomianowej

EstRegWiel charakteryzuje się największym stopniem poprawy MAE w stosunku do MAE pomiarów z akcelerometru:



Rys. 31. Wykres błędów MAE estymacji dla danych surowych - najlepszy model EstRegWiel

3.5 Badania regresji dla danych uśrednionych z ACC

Następny etap polegał na zbadaniu wpływu uśrednienia wartości pomiarowych kąta na dokładność zastosowanych metod regresji. Poniżej przedstawiono przebieg i wyniki tych prac.

3.5.1 Wyznaczanie kąta - uśrednienie pomiarów

Wyznaczono grupę wielomianów odwrotnych dla uśrednionych wartości pomiarowych kątów. Do uśredniania zastosowano prostą średnią ruchomą (ang. Simple Moving Average):

$$SMA_k = \frac{1}{k} \sum_{i=n-k+1}^n p_i \quad (19)$$

gdzie: k – liczba pomiarów z których, obliczana jest średnia,

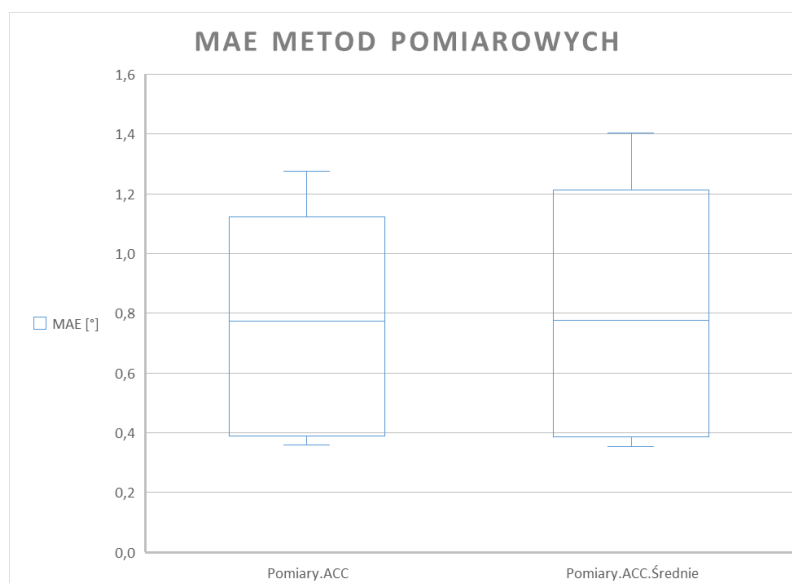
p_i – kolejne wartości pomiarowe,

n – liczba pomiarów

Uśredniania dokonano krokowo dla $k=10$ na zbiorze pomiarów z akcelerometrów, wstępnie przefiltrowanego. Zbiór wejściowy został opisany w rozdziale 3.3.1.2 i tabeli Tabela 22. Uśredniony zbiór pomiarów oznaczono jako Pomiary.ACC.Średnie. W poniższej tabeli przedstawiono ocenę uśrednionych pomiarów kąta na bazie akcelerometru zarejestrowanych dla poszczególnych prędkości kątowych bez uwzględniania fazy ruchu oraz porównanie obu zbiorów pomiarowych (dla danych surowych – Pomiary.ACC i uśrednionych).

Metoda pomiaru	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE [°]	RMSE [°]	R2	Id Zbioru
Pomiary.ACC	80163	7,844	13,960	26,096	44,520	-44,480	-0,162	0,35820	0,18647	0,43182	0,99973	12
	132406	7,725	13,800	25,958	44,430	-44,610	-0,237	0,38256	0,20978	0,45802	0,99970	13
	184540	7,677	11,710	25,916	44,500	-44,590	-0,187	0,39689	0,23658	0,48639	0,99966	14
	68419	7,545	7,870	27,049	44,490	-44,550	-0,161	0,50701	0,33890	0,58215	0,99955	15
	61472	8,529	12,045	28,877	44,500	-44,560	-0,164	0,77397	0,74371	0,86239	0,99913	16
	50021	8,542	10,660	29,622	44,540	-44,550	-0,159	0,88768	1,01365	1,00680	0,99888	17
	39874	9,082	11,310	31,050	44,670	-44,670	-0,160	1,05063	1,59778	1,26403	0,99839	18
	29247	9,751	11,180	33,284	44,540	-44,600	-0,182	1,27540	3,38516	1,83988	0,99705	19
	23693	10,288	5,370	35,265	44,800	-44,560	-0,205	1,19265	5,31739	2,30595	0,99589	20
Pomiary.ACC.Średnie	80163	7,844	13,988	26,094	44,461	-44,453	-0,163	0,35282	0,17982	0,42405	0,99974	12
	132406	7,725	13,891	25,955	44,385	-44,573	-0,237	0,37894	0,20496	0,45272	0,99970	13
	184540	7,677	11,761	25,912	44,452	-44,535	-0,187	0,39515	0,23485	0,48461	0,99966	14
	68419	7,548	7,958	27,046	44,444	-44,513	-0,162	0,50443	0,33704	0,58055	0,99955	15
	61472	8,524	12,070	28,825	44,457	-44,522	-0,165	0,77615	0,74293	0,86193	0,99913	16
	50021	8,534	10,693	29,524	44,479	-44,510	-0,160	0,89674	1,02161	1,01075	0,99886	17
	39874	9,072	11,392	30,939	44,478	-44,539	-0,160	1,07321	1,62713	1,27559	0,99835	18
	29247	9,715	11,372	33,026	44,460	-44,528	-0,183	1,35157	3,57532	1,89085	0,99683	19
	23693	10,210	8,562	34,843	44,471	-44,524	-0,207	1,40445	6,35457	2,52083	0,99496	20

Tabela 25. Statystyki surowych pomiarów kąta na bazie akcelerometru oraz pomiarów uśrednionych



Rys. 32. Wykres błędów MAE metod pomiarowych – surowych pomiarów z akcelerometru (Pomiary.ACC) oraz uśrednionych (Pomiary.ACC.Średnie)

Uśrednianie wprowadziło zwiększenie błędu pomiarowego w stosunku do zbioru wejściowego, szczególnie dla większych wartości prędkości kątowej. Pomiary.ACC: od ok. 0.36° do 1.28°, Pomiary.ACC.Średnie: od ok. 0.35° do 1.40°. Widać, że dla większości przypadków pomiary uśrednione dają bardzo zbliżone lub minimalnie większe błędy MAE niż pomiary surowe, średnio o 0.034° większy błąd MAE, ale w granicach niewielkich odchyleń.

3.5.2 Wyznaczenie wielomianów odwrotnych dla danych uśrednionych

Następnie dla zbiorów danych pomiarowych uśrednionych wyznaczono zestaw wielomianów odwrotnych metodą opisaną w rozdziale 3.2.2.1.

WarSrSpeed	Stopień	R2	X	X^2	X^3	X^4	X^5	X^6	X^7	X^8	
Kierunek WZero											
223,48	8	1,000E+00	5,317E-14	2,146E-12	-9,366E-11	-3,065E-09	1,922E-08	1,996E-07	1,300E-05	1,010E+00	6,419E+00
111,81	8	1,000E+00	-9,225E-15	-2,690E-12	2,097E-11	7,252E-09	-5,169E-08	-6,584E-06	4,156E-05	1,013E+00	3,341E+00
55,93	8	1,000E+00	-2,907E-14	-2,225E-12	1,054E-10	6,811E-09	-1,539E-07	-7,196E-06	8,797E-05	1,013E+00	1,773E+00
37,21	8	1,000E+00	1,233E-14	-2,041E-12	-1,445E-12	6,040E-09	-6,956E-08	-6,525E-06	6,538E-05	1,014E+00	1,255E+00
27,85	8	1,000E+00	5,218E-15	-2,965E-12	2,788E-11	8,822E-09	-1,179E-07	-8,689E-06	9,499E-05	1,014E+00	1,000E+00
13,81	8	1,000E+00	3,317E-14	-2,728E-12	-6,540E-11	7,912E-09	-1,554E-08	-7,759E-06	5,147E-05	1,014E+00	6,241E-01
6,71	8	1,000E+00	3,063E-14	-1,312E-12	-6,609E-11	4,342E-09	-1,251E-08	-5,505E-06	5,654E-05	1,014E+00	4,402E-01
3,22	8	1,000E+00	6,490E-15	-1,286E-12	1,941E-11	3,925E-09	-1,015E-07	-4,622E-06	8,074E-05	1,013E+00	3,930E-01
1,46	8	1,000E+00	-2,588E-14	5,041E-13	1,253E-10	-7,554E-10	-2,109E-07	-1,390E-06	1,197E-04	1,013E+00	2,592E-01
Kierunek MZero											
-223,48	8	1,0000E+00	-5,6205E-13	6,4755E-12	9,9313E-10	-4,5274E-09	-6,2725E-07	-1,8067E-06	1,6838E-04	1,0111E+00	-6,1957E+00
-111,81	8	1,0000E+00	-1,9624E-14	-2,6950E-12	9,1581E-11	7,4239E-09	-1,5785E-07	-7,2129E-06	8,9165E-05	1,0136E+00	-3,1672E+00
-55,93	8	1,0000E+00	-3,6380E-14	-2,7879E-12	1,6200E-10	8,1133E-09	-2,5651E-07	-8,1294E-06	1,3612E-04	1,0141E+00	-1,6364E+00
-37,21	8	1,0000E+00	-4,9539E-14	-3,2182E-12	1,8278E-10	9,4255E-09	-2,5254E-07	-9,3495E-06	1,3360E-04	1,0145E+00	-1,1226E+00
-27,85	8	1,0000E+00	-3,9840E-14	-2,5441E-12	1,6016E-10	7,6066E-09	-2,2493E-07	-7,7596E-06	1,0867E-04	1,0142E+00	-8,5759E-01
-13,81	8	1,0000E+00	-7,0277E-14	-3,0869E-12	2,6332E-10	9,0850E-09	-3,3495E-07	-8,8621E-06	1,4538E-04	1,0146E+00	-4,5541E-01
-6,71	8	1,0000E+00	-7,2890E-14	-1,8032E-12	2,7031E-10	5,9256E-09	-3,3814E-07	-6,9983E-06	1,4332E-04	1,0146E+00	-2,4618E-01
-3,22	8	1,0000E+00	-5,3965E-14	-1,0868E-12	2,0826E-10	3,4704E-09	-2,7583E-07	-4,5376E-06	1,2367E-04	1,0138E+00	-9,6149E-02
-1,46	8	9,9997E-01	-8,8125E-14	5,7496E-13	3,2361E-10	-1,0231E-09	-3,9461E-07	-1,1605E-06	1,6363E-04	1,0137E+00	-1,2897E-01

Tabela 26. Wielomiany odwrotne wyznaczone dla poszczególnych prędkości kątowych na zbiorze danych uśrednionych

Powyższe wielomiany zastosowano do estymacji pomiaru, wyniki i statystyki estymacji znajdują się poniżej dla poszczególnych kierunków ruchu.

Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
WZero	223,48	222,87	224,12	speed_20_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	1728,00	4,42	4,42	0,01	27,46	-32,21	7,87	-6,46	6,46	6,46	1,00	0,86		
Estymacja	1728,00	10,89	10,89	0,01	34,13	-26,10	7,94	0,00	0,01	0,01	1,00	0,86		
Poprawa [%]	0,00	-146,07	-146,08	-0,91	-24,30	18,97	-0,92	100,00	99,85	99,83	0,00	0,31		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
WZero	111,81	111,07	112,42	speed_19_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	4789,00	9,76	9,76	0,01	36,09	-36,35	18,07	-3,45	3,45	3,45	1,00	0,97		
Estymacja	4789,00	13,21	13,22	0,01	39,80	-33,41	18,26	0,00	0,01	0,01	1,00	0,97		
Poprawa [%]	0,00	-35,37	-35,37	-1,02	-10,28	8,08	-1,03	100,00	99,74	99,71	0,00	0,07		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
WZero	55,93	55,54	56,26	speed_18_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	9172,00	12,46	12,46	0,01	40,38	-39,52	40,96	-1,92	1,92	1,92	1,00	0,99		
Estymacja	9172,00	14,38	14,38	0,01	42,55	-38,16	41,37	0,00	0,01	0,01	1,00	0,99		
Poprawa [%]	0,00	-15,41	-15,41	-0,96	-5,38	3,43	-0,99	100,00	99,44	99,37	0,00	0,02		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
WZero	37,21	36,82	37,54	speed_17_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	14827,00	12,66	12,66	0,01	41,77	-40,58	57,49	-1,40	1,40	1,40	1,00	1,00		
Estymacja	14827,00	14,06	14,06	0,01	43,44	-39,73	58,05	0,00	0,01	0,01	1,00	1,00		
Poprawa [%]	0,00	-11,08	-11,08	-0,97	-4,01	2,09	-0,99	100,00	99,18	99,07	0,00	0,01		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
WZero	27,85	27,46	28,18	speed_16_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	21184,00	12,86	12,86	0,01	42,37	-41,10	73,17	-1,15	1,15	1,15	1,00	1,00		
Estymacja	21184,00	14,02	14,02	0,01	43,78	-40,52	73,87	0,00	0,01	0,01	1,00	1,00		
Poprawa [%]	0,00	-8,97	-8,97	-0,92	-3,34	1,42	-0,95	100,00	98,89	98,77	0,00	0,01		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
WZero	13,81	13,42	14,14	speed_15_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	46085,00	10,42	10,42	0,01	43,29	-42,71	160,22	-0,75	0,75	0,75	1,00	1,00		
Estymacja	46085,00	11,16	11,16	0,01	44,34	-42,49	161,78	0,00	0,03	0,03	1,00	1,00		
Poprawa [%]	0,00	-7,17	-7,17	-0,98	-2,42	0,52	-0,98	100,00	96,31	96,12	0,00	0,00		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
WZero	6,71	6,34	7,07	speed_14_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	73838,00	7,86	7,86	0,02	43,81	-43,50	376,31	-0,54	0,54	0,54	1,00	1,00		
Estymacja	73838,00	8,40	8,40	0,02	44,70	-43,49	380,14	0,00	0,04	0,04	1,00	1,00		
Poprawa [%]	0,00	-6,80	-6,80	-1,03	-2,03	0,02	-1,02	100,00	93,38	92,82	0,00	0,00		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
WZero	3,22	2,91	3,54	speed_13_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	132305,00	3,58	3,58	0,01	44,01	-44,10	456,05	-0,44	0,45	0,45	1,00	1,00		
Estymacja	132305,00	4,02	4,02	0,02	44,84	-44,13	460,49	0,00	0,04	0,04	1,00	1,00		
Poprawa [%]	0,00	-12,25	-12,25	-0,98	-1,89	-0,07	-0,97	100,00	91,15	90,49	0,00	0,00		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
WZero	1,46	1,14	1,77	speed_12_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	142048,00	1,25	1,25	0,04	44,21	-44,28	1292,71	-0,28	0,35	0,35	1,00	1,00		
Estymacja	142048,00	1,54	1,54	0,04	44,96	-44,55	1307,38	0,00	0,12	0,12	1,00	1,00		
Poprawa [%]	0,00	-22,59	-22,58	-1,13	-1,71	-0,60	-1,13	100,00	66,30	64,83	0,00	0,00		

Tabela 27. Statystyki pomiarów i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości większych od zera – uśrednianie pomiarów kąta.

Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-223,48	-224,12	-222,87	speed_20_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	1480,00	-2,15	-2,15	0,01	31,97	-27,69	5,46	6,21	6,21	6,21	1,00	0,87		
Estymacja	1480,00	-8,36	-8,36	0,01	26,10	-34,15	5,51	0,00	0,01	0,01	1,00	0,87		
Poprawa [%]	0,00	-288,44	-288,46	-1,02	18,35	-23,33	-1,01	100,00	99,85	99,83	0,00	0,26		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-111,81	-112,42	-111,07	speed_19_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	4543,00	-3,75	-3,75	0,01	36,19	-36,25	16,30	3,20	3,20	3,20	1,00	0,98		
Estymacja	4543,00	-6,95	-6,95	0,01	33,41	-39,81	16,47	0,00	0,01	0,01	1,00	0,97		
Poprawa [%]	0,00	-85,38	-85,37	-1,08	7,69	-9,83	-1,07	100,00	99,72	99,68	0,00	0,06		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-55,93	-56,26	-55,54	speed_18_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	8878,00	-6,07	-6,07	0,01	39,39	-40,48	30,36	1,69	1,69	1,69	1,00	0,99		
Estymacja	8878,00	-7,76	-7,76	0,01	38,16	-42,55	30,68	0,00	0,01	0,01	1,00	0,99		
Poprawa [%]	0,00	-27,91	-27,91	-1,06	3,13	-5,11	-1,05	100,00	99,41	99,34	0,00	0,01		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-37,21	-37,54	-36,82	speed_17_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	14622,00	-6,90	-6,90	0,01	40,44	-41,88	46,39	1,19	1,19	1,19	1,00	1,00		
Estymacja	14622,00	-8,09	-8,09	0,01	39,72	-43,43	46,89	0,00	0,01	0,01	1,00	1,00		
Poprawa [%]	0,00	-17,20	-17,20	-1,06	1,78	-3,71	-1,06	100,00	99,10	98,99	0,00	0,01		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-27,85	-28,18	-27,46	speed_16_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	21042,00	-7,87	-7,87	0,01	40,99	-42,37	63,93	0,94	0,94	0,94	1,00	1,00		
Estymacja	21042,00	-8,81	-8,81	0,01	40,56	-43,67	64,61	0,00	0,01	0,01	1,00	1,00		
Poprawa [%]	0,00	-11,94	-11,94	-1,06	1,06	-3,07	-1,07	100,00	98,63	98,49	0,00	0,00		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-13,81	-14,14	-13,42	speed_15_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	45659,00	-8,91	-8,91	0,01	42,54	-43,40	149,98	0,55	0,55	0,55	1,00	1,00		
Estymacja	45659,00	-9,46	-9,46	0,01	42,48	-44,30	151,56	0,00	0,03	0,03	1,00	1,00		
Poprawa [%]	0,00	-6,17	-6,17	-1,07	0,13	-2,09	-1,06	100,00	94,99	94,75	0,00	0,00		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-6,71	-7,07	-6,34	speed_14_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	73223,00	-6,49	-6,49	0,01	43,35	-43,94	313,62	0,31	0,35	0,35	1,00	1,00		
Estymacja	73223,00	-6,80	-6,80	0,01	43,52	-44,68	317,01	0,00	0,03	0,04	1,00	1,00		
Poprawa [%]	0,00	-4,83	-4,83	-1,11	-0,38	-1,70	-1,08	100,00	90,16	89,42	0,00	0,00		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-3,22	-3,54	-2,91	speed_13_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	131982,00	-1,14	-1,14	0,01	43,87	-44,16	424,51	0,10	0,27	0,27	1,00	1,00		
Estymacja	131982,00	-1,24	-1,24	0,01	44,18	-44,75	428,91	0,00	0,04	0,04	1,00	1,00		
Poprawa [%]	0,00	-8,95	-8,95	-1,05	-0,71	-1,33	-1,04	100,00	85,54	84,55	0,00	0,00		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-1,46	-1,77	-1,14	speed_12_100_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	142585,00	-0,70	-0,70	0,04	44,24	-44,22	1199,88	0,13	0,30	0,30	1,00	1,00		
Estymacja	142585,00	-0,83	-0,83	0,04	44,58	-44,93	1214,34	0,00	0,12	0,12	1,00	1,00		
Poprawa [%]	0,00	-18,28	-18,25	-1,22	-0,76	-1,61	-1,21	100,00	59,88	58,51	0,00	0,00		

Tabela 28. Statystyki pomiarów i estymacji wielomianami odwrotnymi – dla prędkości mniejszych od zera – uśrednianie pomiarów kąta.

Dla danych obejmujących grupy zarejestrowanych pomiarów uśrednionych MAE wartości pomiarowych także rośnie z prędkością kątową i wynosi: od 0,35 do 6,46° (WZero) (Tabela 27) oraz od 0,27 do 6,21° (MZero) (Tabela 28). Jednocześnie zawęża się zakres prędkości,

przykładowo dla najwyższej prędkości kierunku WZero z [69,68°/s, 228,80°/s] (wszystkie grupy) (Tabela 5) do [221,52°/s, 228,80°/s] (grupy pomiarów uśrednionych) (Tabela 27). Jako prędkość wzorcową dla danego wielomianu odwrotnego wybierana jest wartość WarSrSpeed.

Wyznaczone wielomiany odwrotne równie skutecznie działają dla danej prędkości kątowej. W zależności od prędkości kątowej poprawa wartości MAE estymacji: dla kierunku WZero wynosi od 66,30% do 99,85%, dla kierunku MZero od 59,88% do 99,85% i jest najwyższa ze wszystkich wcześniej wyznaczonych grup wielomianów odwrotnych. Dla pomiarów w fazie ruchu wartość poprawy MAE także rośnie wraz z prędkością kątową.

Nr	Prędkość kątowa [°/s]	Id zbioru danych	Wszystkie próbki (WZero)			Grupy co najmniej 200 próbek (WZero)			Filtracja (WZero)			Uśrednione (WZero)		
			MAE pomiar [°]	MAE estymacja [°]	Poprawa [%]	MAE pomiar [°]	MAE estymacja [°]	Poprawa [%]	MAE pomiar [°]	MAE estymacja [°]	Poprawa [%]	MAE pomiar [°]	MAE estymacja [°]	Poprawa [%]
1.	1,76	12							0,35	0,12	65,62	0,35	0,12	66,30
2.	3,52	13	0,42	0,05	88,62	0,41	0,05	88,66	0,42	0,05	89,02	0,45	0,04	91,15
3.	7,031	14	0,46	0,05	89,97	0,46	0,05	89,87	0,47	0,04	90,72	0,54	0,05	93,38
4.	14,06	15	0,68	0,04	94,29	0,69	0,04	94,47	0,70	0,04	94,30	0,75	0,03	96,31
5.	28,12	16	1,12	0,04	96,69	1,13	0,03	97,02	1,14	0,03	97,20	1,15	0,01	98,89
6.	37,50	17	1,38	0,04	97,07	1,39	0,04	97,41	1,39	0,03	97,71	1,40	0,01	99,18
7.	56,25	18	1,88	0,04	97,65	1,89	0,04	98,06	1,91	0,03	98,35	1,92	0,01	99,44
8.	112,50	19	3,40	0,08	97,70	3,44	0,04	98,73	3,49	0,03	99,06	3,45	0,01	99,74
9.	225,00	20	6,31	0,24	96,24	6,40	0,10	98,43	6,52	0,04	99,43	6,46	0,01	99,85

Tabela 29. Statystyki estymacji oraz stopień poprawy danych pomiarowych dla poszczególnych grup wielomianów odwrotnych wyznaczonych dla kierunku WZero.

Nr	Prędkość kątowa [°/s]	Id zbioru danych	Wszystkie próbki (MZero)			Grupy co najmniej 200 próbek (MZero)			Filtracja (MZero)			Uśrednione (MZero)		
			MAE pomiar [°]	MAE estymacja [°]	Poprawa [%]	MAE pomiar [°]	MAE estymacja [°]	Poprawa [%]	MAE pomiar [°]	MAE estymacja [°]	Poprawa [%]	MAE pomiar [°]	MAE estymacja [°]	Poprawa [%]
1.	-1,76	12							0,30	0,12	59,70	0,30	0,12	59,88
2.	-3,52	13	0,27	0,05	83,22	0,27	0,05	83,14	0,27	0,04	84,02	0,27	0,04	85,54
3.	-7,031	14	0,32	0,05	86,06	0,32	0,05	86,06	0,32	0,04	86,81	0,35	0,03	90,16
4.	-14,06	15	0,51	0,04	92,42	0,52	0,04	92,60	0,52	0,04	92,30	0,55	0,03	94,99
5.	-28,12	16	0,90	0,04	95,92	0,91	0,03	96,20	0,93	0,03	96,36	0,94	0,01	98,63
6.	-37,50	17	1,19	0,04	96,91	1,20	0,03	97,21	1,20	0,03	97,46	1,19	0,01	99,10
7.	-56,25	18	1,69	0,04	97,55	1,69	0,04	97,59	1,71	0,03	98,28	1,69	0,01	99,41
8.	-112,50	19	3,17	0,07	97,85	3,17	0,07	97,85	3,24	0,03	99,10	3,20	0,01	99,72
9.	-225,00	20	6,09	0,15	97,46	6,11	0,15	97,50	6,29	0,04	99,36	6,21	0,01	99,85

Tabela 30. Statystyki estymacji oraz stopień poprawy danych pomiarowych dla poszczególnych grup wielomianów odwrotnych wyznaczonych dla kierunku MZero.

Z powyższych tabel wynika, że najlepsze wyniki estymacji uzyskano, dla grup wielomianów odwrotnych wyznaczonych na podstawie danych pomiarowych przefiltrowanych i uśrednionych, dlatego te grupy wielomianów zostały wybrane do dalszych eksperymentów.

3.5.3 Wyznaczenie modelu wielomianu odwrotnego z uwzględnieniem prędkości kątowej dla uśrednionych danych pomiarowych

Z wykorzystaniem opisanej wcześniej (rozdział 3.3.1.3) metody wyznaczenia wielomianu odwrotnego dla danej prędkości kątowej z ortometru przeprowadzono regresję na bazie współczynników wielomianów odwrotnych z wykorzystaniem wielomianów odwrotnych wyznaczonych z danych uśrednionych (macierz ASrednie).

```
ASrednia = [
223.479, 8, 0.999999711, 5.31716E-14, 2.14553E-12, -9.36621E-11, -3.06547E-09, 1.92177E-08, 1.99618E-07, 1.30006E-05, 1.009928502, 6.418588793;
111.815, 8, 0.999999978, -9.22468E-15, -2.68991E-12, 2.09704E-11, 7.2524E-09, -5.16897E-08, -6.58436E-06, 4.15614E-05, 1.012883204, 3.340585723;
55.931, 8, 0.999999716, -2.90688E-14, -2.22539E-12, 1.05448E-10, 6.81131E-09, -1.53891E-07, -7.19602E-06, 8.79684E-05, 1.013462024, 1.773127164;
37.211, 8, 0.999999715, 1.23283E-14, -2.04071E-12, -1.44535E-12, 6.0399E-09, -6.95628E-08, -6.5249E-06, 6.53779E-05, 1.01362229, 1.255406241;
27.851, 8, 0.999999595, 5.21843E-15, -2.96465E-12, 2.7884E-11, 8.82187E-09, -1.17853E-07, -8.68914E-06, 9.49897E-05, 1.013980987, 1.000104035;
13.811, 8, 0.999998092, 3.3168E-14, -2.728E-12, -6.5405E-11, 7.91204E-09, -1.55379E-08, -7.75868E-06, 5.14745E-05, 1.014057934, 0.624128658;
6.708, 8, 0.999996872, 3.06265E-14, -1.31165E-12, -6.60922E-11, 4.34201E-09, -1.25148E-08, -5.505E-06, 5.65356E-05, 1.013852373, 0.440238749;
3.224, 8, 0.999996651, 6.48993E-15, -1.28634E-12, 1.94135E-11, 3.92534E-09, -1.01453E-07, -4.62176E-06, 8.07357E-05, 1.013379788, 0.393047463;
1.456, 8, 0.999970889, -2.58828E-14, 5.04063E-13, 1.25252E-10, -7.55371E-10, -2.10882E-07, -1.38971E-06, 0.000119684, 1.013342411, 0.259192628;
-1.456, 8, 0.999970919, -8.81248E-14, 5.74964E-13, 3.23611E-10, -1.02309E-09, -3.9461E-07, -1.16048E-06, 0.000163625, 1.013721295, -0.128970298;
-3.224, 8, 0.99996862, -5.39655E-14, -1.0868E-12, 2.08263E-10, 3.47037E-09, -2.7583E-07, -4.53761E-06, 0.000123666, 1.013816623, -0.096149249;
-6.708, 8, 0.99997195, -7.28899E-14, -1.80324E-12, 2.70307E-10, 5.92564E-09, -3.3814E-07, -6.99834E-06, 0.000143324, 1.014583544, -0.24618054;
-13.811, 8, 0.999980808, -7.02768E-14, -3.08693E-12, 2.63324E-10, 9.08496E-09, -3.34951E-07, -8.86212E-06, 0.000145375, 1.014594377, -0.455406666;
-27.851, 8, 0.99999614, -3.98399E-14, -2.54414E-12, 1.60156E-10, 7.60661E-09, -2.24928E-07, -7.7596E-06, 0.000108671, 1.014164399, -0.857591417;
-37.211, 8, 0.99999769, -4.95391E-14, -3.21821E-12, 1.82776E-10, 9.42547E-09, -2.52536E-07, -9.34952E-06, 0.000133603, 1.014456241, -1.12260279;
-55.931, 8, 0.99999791, -3.63801E-14, -2.78786E-12, 1.61999E-10, 8.11328E-09, -2.56514E-07, -8.12942E-06, 0.000136122, 1.014051653, -1.636442126;
-111.814, 8, 0.99999841, -1.96237E-14, -2.69503E-12, 9.15807E-11, 7.42387E-09, -1.57848E-07, -7.21289E-06, 8.91646E-05, 1.013556666, -3.167167235;
-223.478, 8, 0.99999689, -5.62052E-13, 6.47553E-12, 9.93126E-10, -4.5274E-09, -6.27251E-07, -1.80673E-06, 0.000168376, 1.011109699, -6.195690505;
];
% Wyciąganie kolumn z danymi srednimi z 10 pomiarów ---
WarSrSpeedSred = ASrednia(:, 1);
RWparamTSPSred = ASrednia(:, 4:end);
%display(RWparamTSPSred);
% Interpolacja Splinowa dla każdego parametru
RWparamSred = cell(1, size(RWparamTSPSred, 2));
for i = 1:size(RWparamTSPSred, 2)
    RWparamSred{i} = spline(WarSrSpeedSred, RWparamTSPSred(:, i));
end

% Estymacja wielomianu - dla całego zbioru danych
for j = 1:size(DataESTm, 1)
    WarSpeed = DataESTm.Speed(j);
    % Obliczanie wartości parametrów dla przykładowej prędkości kątowej
    RWparamSpeedSred = cellfun(@(pp) ppval(pp, WarSpeed), RWparamSred); %dla całego zbioru danych srednich z 10 pomiarów
    % Tworzenie wielomianu 8 stopnia na podstawie parametrów
    POM = DataESTm.Pomiary(j); %Pomiary(i);
    DataESTm.EstRegWielSred(j) = polyval([RWparamSpeedSred], POM); %dla całego zbioru danych srednich z 10 pomiarów
end
```

Listing 8. Skrypt wyznaczający wielomiany odwrotne z uwzględnieniem prędkości kątowej dla danych uśrednionych – model EstRegWielSred

Tak powstał model wielomianu odwrotnego z uwzględnieniem prędkości kątowej EstRegWielSred. Jak można się spodziewać wyniki estymacji globalnie będą gorsze niż przy zastosowaniu wielomianu odwrotnego dedykowanego jednej prędkości kątowej, jednak metoda ta pozwala wyznaczyć wielomian dla różnych prędkości kątowych. Metoda wymaga wyznaczenia wielomianów odwrotnych dla większej liczby prędkości kątowych (z zawężonym zakresem prędkości min-max).

Efekty działania wszystkich modeli, w tym EstRegWielSred, omówionych w tym rozdziale są przedstawione w podsumowaniu wyników estymacji (patrz rozdział 3.5.5).

3.5.4 Wyznaczenie modeli RFP, MLP oraz KNN dla danych uśrednionych

Wyznaczono modele na bazie danych uśrednionych metodą opisaną w rozdziale 3.3.2. Zestawienie statystyk i parametrów wygenerowanych dla każdego kierunku znajduje się w poniższych tabelach.

Model	MSE [°]	MAE [°]	R2	Best Parameters Found
RandomForest	0.001748	0.017903	0.999997	max_depth: 20 min_samples_leaf: 1 min_samples_split: 2 n_estimators: 290
KNN	0.002871	0.001748	0.017903	algorithm: brute n_neighbors: 5 weights: distance
MLP	0.003049	0.043454	0.999995	activation: relu alpha: 0.0001 hidden_layer_sizes: (30, 30) learning_rate: constant solver: adam

Tabela 31. Statystyki modeli RF, KNN i MLP dla danych uśrednionych i kierunku WZero oraz ich parametry

Model	MSE	MAE	R2	Best Parameters Found
RandomForest	0.006468	0.054743	0.999988	max_depth: 20 min_samples_leaf: 1 min_samples_split: 10 n_estimators: 300
KNN	0.012157	0.063829	0.999978	algorithm: auto n_neighbors: 4 weights: distance
MLP	0.0022422	0.037362	0.999996	activation: relu alpha: 0.001 hidden_layer_sizes: (20, 20) learning_rate: constant solver: adam

Tabela 32. Statystyki modeli RF, KNN i MLP dla danych uśrednionych i kierunku MZero oraz ich parametry

Najlepsze wyniki dla kierunku WZero (Tabela 31) uzyskał model RF (MSE=0.001748°, MAE=0.017903°), osiągając najniższy poziom błędów zarówno w ujęciu średniokwadratowym, jak i bezwzględnym. Dla kierunku MZero (Tabela 32) najniższe wartości błędów uzyskał model MLP (MSE = 0.0022422°, MAE = 0.037362°).

3.5.5 Wyniki estymacji dla danych uśrednionych z ACC

W oparciu o zbiór danych pomiarowych uśrednionych Pomiary.ACC.Średnie dokonano estymacji modeli wyznaczonych w oparciu o dane surowe wyszczególnione w rozdziale 3.4 oraz modeli wyznaczonych w oparciu o dane uśrednione:

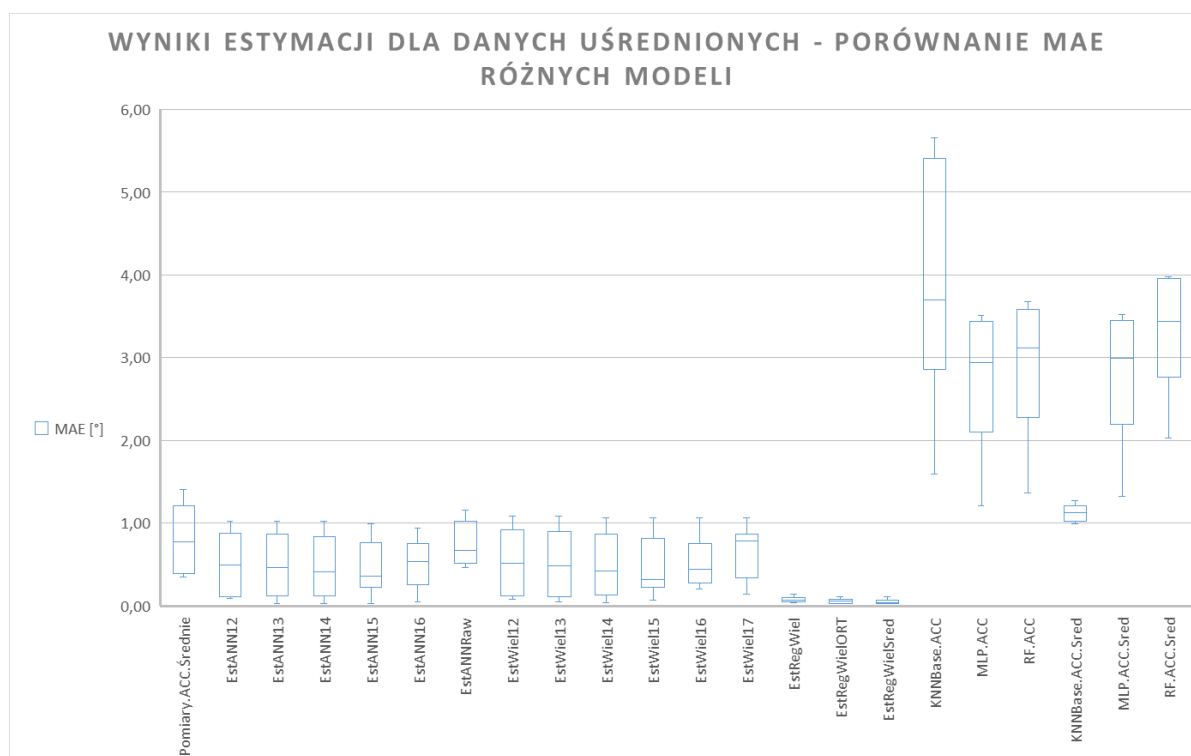
- model regresji wielomianowej stworzony w oparciu o uśrednione pomiary kąta wyznaczonego na podstawie danych z akcelerometru oraz o wartości prędkości kątowej – model EstRegWielSred (patrz rozdział 3.5.3),
- modele regresji MultiLayerPerceptron, RandomForest oraz K-Nearest Neighbors stworzone w oparciu o uśrednione pomiary kąta wyznaczonego na podstawie danych z akcelerometru oraz o wartości prędkości kątowej – MLP.ACC.Srednie, KNNBase.ACC.Srednie oraz RF.ACC.Srednie (patrz rozdział 3.5.4).

Poddano estymacji także modele wyznaczone podczas badań na stanowisku obrotowym ortometru (opisanego w dalszej części pracy w rozdziale 3.7):

- model regresji wielomianowej stworzony w oparciu o pomiary kąta wyznaczonego przez ortometr oraz o prędkość kątową – model EstRegWielORT (patrz rozdział 3.7.2),
- modele regresji MultiLayerPerceptron, RandomForest oraz K-Nearest Neighbors stworzone w oparciu o pomiary kąta wyznaczonego przez ortometr na podstawie wskazań akcelerometru oraz o prędkość kątową - MLP.ORT, KNNBase.ORT oraz RF.ORT (patrz rozdział 3.7.3).

Wyniki estymacji modeli dla danych uśrednionych z akcelerometru przedstawiono w tabeli Tabela 90. Ze względu na rozmiar tabeli została ona umieszczona w sekcji z załącznikami. Poniżej przedstawiono wyniki na wykresach porównujących błędy MAE poszczególnych modeli i pomiarów.

Modele regresji wielomianowej EstRegWielSred, EstRegWielORT, EstRegWiel – osiągają najniższe wartości MAE, rzędu $0.05\text{--}0.08^\circ$. Ich rozkłady są zwarte, bez dużych odchyłeń – to najbardziej stabilne i najdokładniejsze modele. Modele EstANN (sieci neuronowe) EstANN12–16 – mają średni MAE ok. $0.45\text{--}0.5^\circ$, rozkłady są dość spójne. EstANNRaw – wypada znacznie gorzej (ok. 0.75°), wskazując na gorszą kalibrację w porównaniu z wersjami dopasowanymi. Modele EstWiel EstWiel12–17 – wartości MAE są podobne do EstANN (średnio $0.47\text{--}0.65^\circ$), ale rozrzut jest większy. EstWiel17 szczególnie odstaje w górę ($\sim 0.65^\circ$). Algorytmy MLP.ACC, MLP.ACC.Sred – MAE w granicach $2.7\text{--}2.8^\circ$, znacznie wyższe od EstANN czy EstWiel. RF.ACC, RF.ACC.Sred – jeszcze gorzej, ok. $2.9\text{--}3.3^\circ$. Najgorszy wynik osiągnął KNNBase.ACC, średnio prawie 4° , z szerokim rozrzutem wartości. Porównanie wszystkich estymowanych modeli pokazuje poniższy wykres:

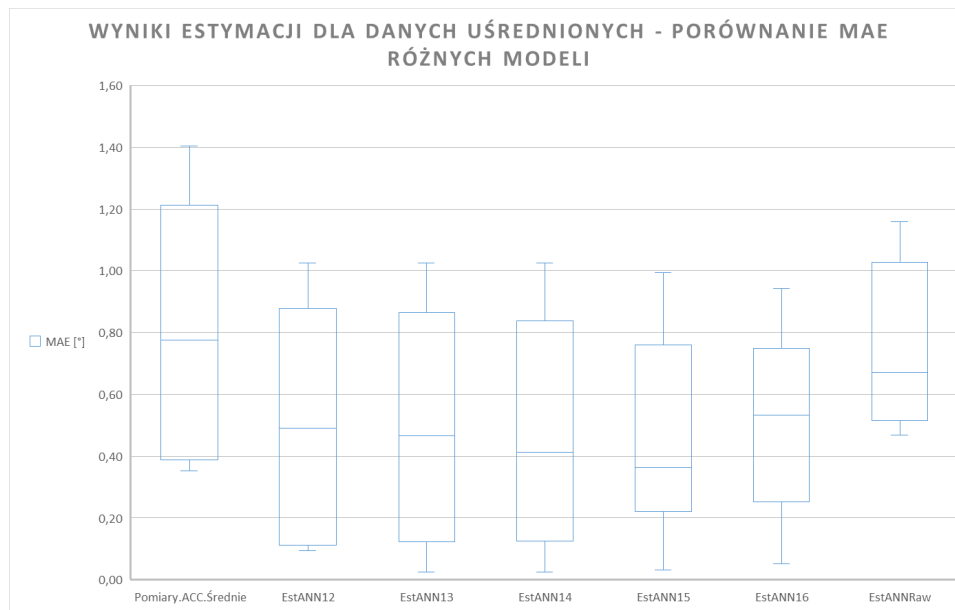


Rys. 33. Wykres błędów MAE estymacji modeli dla danych uśrednionych

W grupie modeli sieci neuronowych poszczególne modele prezentują się następująco:

- EstANN12 – średnia 0.49° , mediana 0.38° , std 0.38° , zakres 0.09 – 1.03° .
- EstANN13 – średnia 0.47° , mediana 0.37° , std 0.38° , zakres 0.02 – 1.03° .
- EstANN14 – średnia 0.46° , mediana 0.38° , std 0.38° , zakres 0.02 – 1.02° .
- EstANN15 – średnia 0.45° , mediana 0.39° , std 0.33° , zakres 0.03 – 0.99° .
- EstANN16 – średnia 0.51° , mediana 0.48° , std 0.29° , zakres 0.05 – 0.94° .
- EstANNRaw – średnia 0.75° , mediana 0.65° , std 0.27° , zakres 0.47 – 1.16° .

EstANN 12–16 dają podobne, umiarkowane wyniki, natomiast EstANNRaw jest wyraźnie słabszy. Porównanie modeli z tej grupy zaprezentowano na poniższym wykresie:

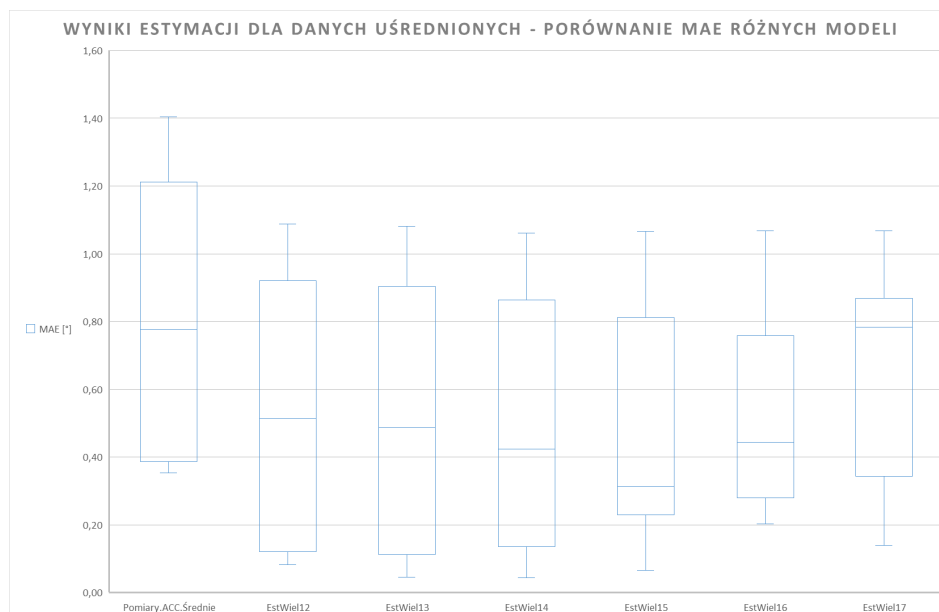


Rys. 34. Wykres błędów MAE estymacji modeli z grupy EstANN dla danych uśrednionych

W grupie modeli regresji wielomianowej poszczególne modele prezentują się następująco:

- EstWiel12 – średnia 0.52° , mediana 0.44° , std 0.40° , zakres 0.08 – 1.09° .
- EstWiel13 – średnia 0.50° , mediana 0.45° , std 0.40° , zakres 0.05 – 1.08° .
- EstWiel14 – średnia 0.47° , mediana 0.39° , std 0.39° , zakres 0.04 – 1.06° .
- EstWiel15 – średnia 0.48° , mediana 0.41° , std 0.35° , zakres 0.07 – 1.07° .
- EstWiel16 – średnia 0.51° , mediana 0.48° , std 0.30° , zakres 0.20 – 1.07° .
- EstWiel17 – średnia 0.65° , mediana 0.63° , std 0.32° , zakres 0.14 – 1.07° .

Wyniki zbliżone do EstANN*, choć rozrzut większy, szczególnie w EstWiel17. Porównanie modeli z tej grupy zaprezentowano na poniższym wykresie:

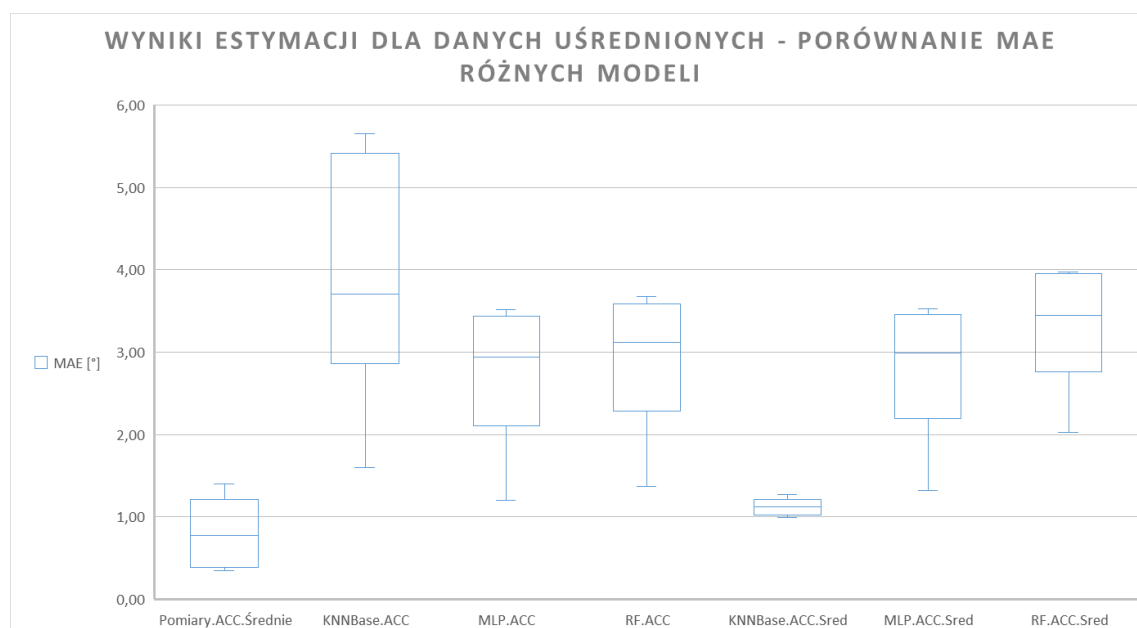


Rys. 35. Wykres błędów MAE estymacji modeli z grupy EstWiel dla danych uśrednionych

W grupie modeli MLP, RF i KNN poszczególne modele prezentują się następująco:

- MLP.ACC – średnia 2.75° , mediana 2.91° , std 0.81° , zakres $1.21\text{--}3.52^{\circ}$.
- MLP.ACC.Sred – średnia 2.80° , mediana 2.86° , std 0.77° , zakres $1.32\text{--}3.53^{\circ}$.
- RF.ACC – średnia 2.91° , mediana 3.11° , std 0.80° , zakres $1.37\text{--}3.68^{\circ}$.
- RF.ACC.Sred – średnia 3.32° , mediana 3.48° , std 0.69° , zakres $2.03\text{--}3.98^{\circ}$.
- KNNBase.ACC – średnia 3.92° , mediana 3.92° , std 1.40° , zakres $1.60\text{--}5.65^{\circ}$.
- KNNBase.ACC.Sred – średnia 1.12° , mediana 1.11° , std 0.10° , zakres $1.00\text{--}1.27^{\circ}$.

Bardzo duże błędy i spory rozrzut. Oba modele MLP, oba RF oraz KNNBase.ACC mają kilkukrotnie wyższe błędy od uśrednionych pomiarów. Jedynie KNNBase.ACC.Sred zbliża się do wyników pomiarów, ale nadal jest gorszy ($MAE \sim 1.1^{\circ}$ vs 0.8°). Porównanie modeli z tej grupy zaprezentowano na poniższym wykresie:



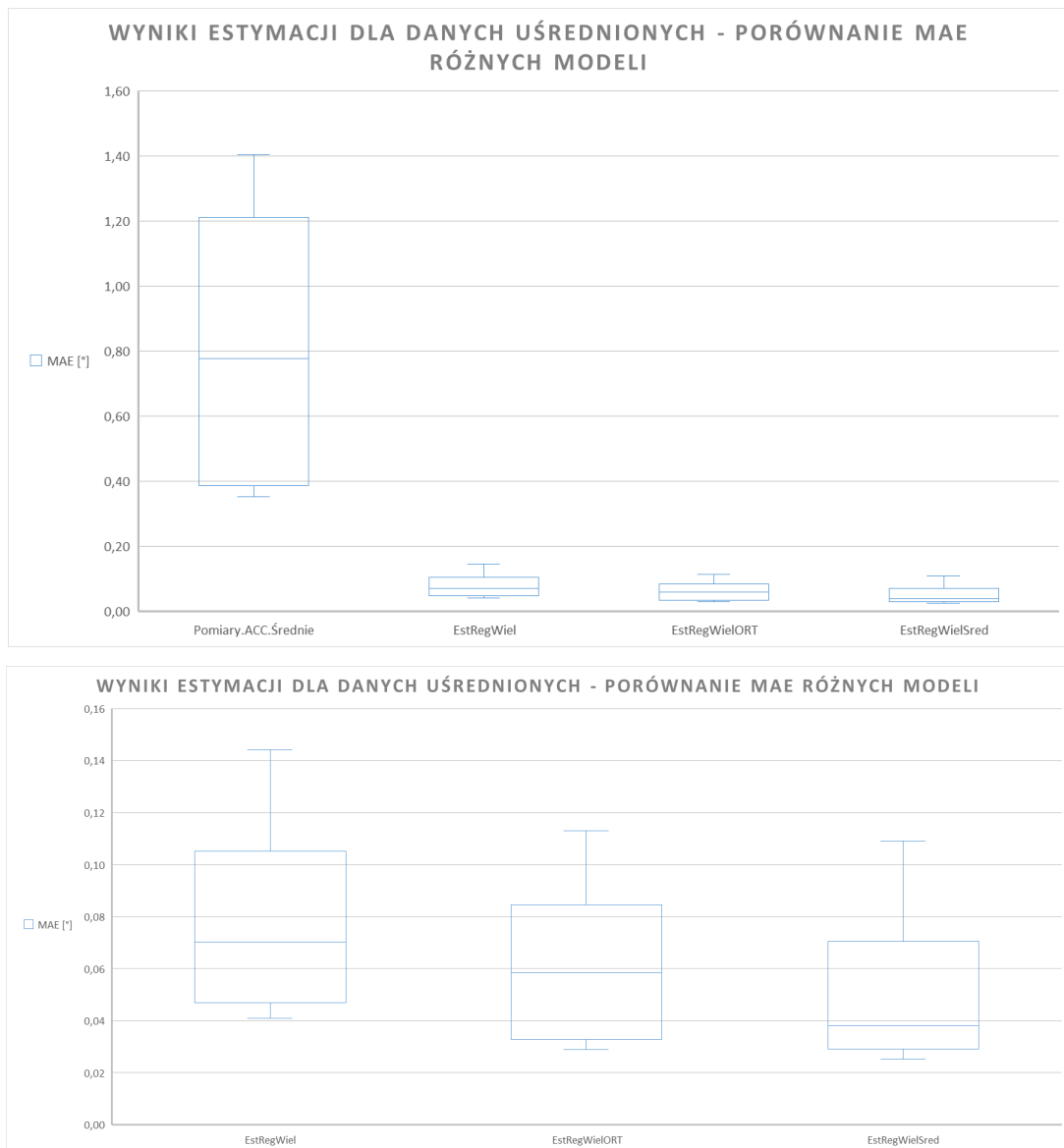
Rys. 36. Wykres błędów MAE estymacji dla danych uśrednionych modeli uwzględniających prędkość kątową

Ostatnią grupę modeli, które okazały się najlepsze w tym zestawieniu stanowią modele regresji wielomianowej z uwzględnieniem prędkości kątowej:

- EstRegWielSred - średnia 0.05° , mediana 0.04° , std 0.03° , zakres $0.03\text{--}0.11^\circ$.
- EstRegWielORT - średnia 0.06° , mediana 0.05° , std 0.03° , zakres $0.03\text{--}0.11^\circ$.
- EstRegWiel -średnia 0.08° , mediana 0.07° , std 0.04° , zakres $0.04\text{--}0.14^\circ$.

Wszystkie modele EstReg mają ponad $10\times$ niższy błąd niż Pomiary.ACC.Średnie, przy bardzo małej zmienności wyników (std $<0.04^\circ$). Modele EstRegWiel* są najdokładniejsze ze wszystkich – ich MAE mieści się w przedziale $0.03\text{--}0.14^\circ$, czyli znacznie poniżej poziomu Pomiary.ACC.Średnie. Pomiary uśrednione osiągają $\sim 0.8^\circ$, a EstReg tylko $0.05\text{--}0.08^\circ$ — różnica jest rzędu wielkości całego błędu. Dodatkowo, rozkłady EstReg są bardzo zwarte wysoka stabilność w porównaniu z dużą zmiennością pomiarów uśrednionych. Najlepszy wynik ze wszystkich **EstRegWielSred – najniższe wartości błędu, bardzo stabilne** Średnia MAE 0.05° , mediana MAE 0.04° , std 0.03° , zakres MAE $0.03\text{--}0.11^\circ$. Porównanie najlepszych modeli zaprezentowano na poniższych wykresach:

.



Rys. 37. Wykresy błędów MAE estymacji modeli EstRegWiel dla danych uśrednionych (wykres górny pokazuje także Pomiary.ACC.Średnie)

3.6 Badania regresji dla danych z akcelerometru i żyroskopu

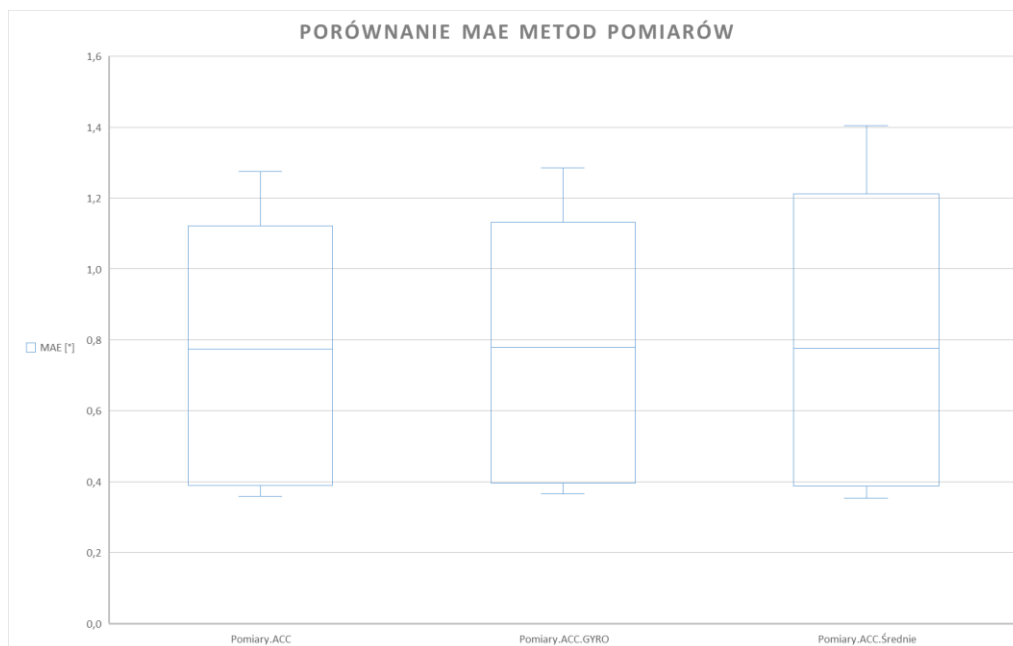
Ostatni etap badań na pierwszym stanowisku pomiarowym dotyczył metod regresji na bazie kąta wyznaczonego na podstawie wskazań akcelerometru i żyroskopu oraz prędkości kątowej obrotu silnika krokowego. Poniżej przedstawiono przebieg i wyniki tych prac.

3.6.1 Wyznaczanie kąta na podstawie wskazań akcelerometru i żyroskopu

W poniższej tabeli przedstawiono ocenę pomiarów kąta na bazie akcelerometru i żyroskopu (metoda pomiaru Pomiary.ACC.GYRO) zarejestrowanych dla poszczególnych prędkości kątowych bez uwzględniania fazy ruchu oraz porównanie z wcześniejszymi metodami pomiarowymi (dla danych surowych – Pomiary.ACC i uśrednionych – Pomiary.ACC.Średnie).

Metoda pomiaru	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE [°]	RMSE [°]	R2	Id Speed
Pomiary.ACC	80163	7,844	13,960	26,096	44,520	-44,480	-0,162	0,35820	0,18647	0,43182	0,99973	12
	132406	7,725	13,800	25,958	44,430	-44,610	-0,237	0,38256	0,20978	0,45802	0,99970	13
	184540	7,677	11,710	25,916	44,500	-44,590	-0,187	0,39689	0,23658	0,48639	0,99966	14
	68419	7,545	7,870	27,049	44,490	-44,550	-0,161	0,50701	0,33890	0,58215	0,99955	15
	61472	8,529	12,045	28,877	44,500	-44,560	-0,164	0,77397	0,74371	0,86239	0,99913	16
	50021	8,542	10,660	29,622	44,540	-44,550	-0,159	0,88768	1,01365	1,00680	0,99888	17
	39874	9,082	11,310	31,050	44,670	-44,670	-0,160	1,05063	1,59778	1,26403	0,99839	18
	29247	9,751	11,180	33,284	44,540	-44,600	-0,182	1,27540	3,38516	1,83988	0,99705	19
	23693	10,288	5,370	35,265	44,800	-44,560	-0,205	1,19265	5,31739	2,30595	0,99589	20
Pomiary.ACC.GYRO	80163	7,837	13,938	26,088	44,509	-44,485	-0,170	0,36559	0,19374	0,44016	0,99972	12
	132406	7,719	13,800	25,951	44,401	-44,639	-0,244	0,38967	0,21775	0,46663	0,99968	13
	184540	7,670	11,695	25,908	44,494	-44,585	-0,193	0,40371	0,24428	0,49425	0,99964	14
	68419	7,538	7,878	27,040	44,463	-44,583	-0,168	0,51157	0,34729	0,58931	0,99954	15
	61472	8,521	12,042	28,868	44,494	-44,584	-0,173	0,77911	0,75384	0,86824	0,99912	16
	50021	8,534	10,653	29,612	44,534	-44,584	-0,168	0,89438	1,02544	1,01264	0,99886	17
	39874	9,073	11,292	31,039	44,656	-44,670	-0,170	1,05861	1,61058	1,26909	0,99838	18
	29247	9,740	11,179	33,272	44,535	-44,627	-0,193	1,28558	3,40181	1,84440	0,99704	19
	23693	10,276	5,374	35,253	44,797	-44,585	-0,218	1,20485	5,33806	2,31043	0,99587	20
Pomiary.ACC.Średnie	80163	7,844	13,988	26,094	44,461	-44,453	-0,163	0,35282	0,17982	0,42405	0,99974	12
	132406	7,725	13,891	25,955	44,385	-44,573	-0,237	0,37894	0,20496	0,45272	0,99970	13
	184540	7,677	11,761	25,912	44,452	-44,535	-0,187	0,39515	0,23485	0,48461	0,99966	14
	68419	7,548	7,958	27,046	44,444	-44,513	-0,162	0,50443	0,33704	0,58055	0,99955	15
	61472	8,524	12,070	28,825	44,457	-44,522	-0,165	0,77615	0,74293	0,86193	0,99913	16
	50021	8,534	10,693	29,524	44,479	-44,510	-0,160	0,89674	1,02161	1,01075	0,99886	17
	39874	9,072	11,392	30,939	44,478	-44,539	-0,160	1,07321	1,62713	1,27559	0,99835	18
	29247	9,715	11,372	33,026	44,460	-44,528	-0,183	1,35157	3,57532	1,89085	0,99683	19
	23693	10,210	8,562	34,843	44,471	-44,524	-0,207	1,40445	6,35457	2,52083	0,99496	20

Tabela 33. Statystyki surowych pomiarów kąta na bazie akcelerometru, akcelerometru i żyroskopu oraz pomiarów z akcelerometru uśrednionych



Rys. 38. Wykres błędów MAE metod pomiarowych – surowych pomiarów z akcelerometru (Pomiary.ACC), akcelerometru i żyroskopu (Pomiary.ACC.GYRO), uśrednionych z akcelerometru (Pomiary.ACC.Średnie)

Wprowadzenie do wyznaczenia kąta danych z żyroskopu nie wpłynęło znacząco na błędy pomiarowe. Pomiary.ACC.GYRO: praktycznie identyczne średnie MAE (0.766°) i zakres $0.37\text{--}1.29^\circ$. Pomiary.ACC: najniższe średnie MAE (0.758°) i zakres $0.36\text{--}1.28^\circ$. Pomiary.ACC.Średnie: nieco wyższe średnie MAE (0.793°) oraz najszerszy zakres błędu ($0.35\text{--}1.40^\circ$), co świadczy o większej zmienności.

3.6.2 Modele KNNBase, MLP i RF

Wyznaczono modele na bazie danych pochodzących z akceleratora i żyroskopu metodą opisaną w rozdziale 3.3.2. Zestawienie statystyk i parametrów wygenerowanych dla każdego kierunku znajduje się w poniższych tabelach.

Model	MSE	MAE	R2	Best Parameters Found
RandomForest	0.000768	0.014571	0.999998	rf__max_depth: 10 rf__min_samples_leaf: 1 rf__min_samples_split: 2 rf__n_estimators: 11
KNN	0.178805	0.042367	0.999438	algorithm: auto n_neighbors: 9 weights: distance
MLP	0.005193	0.055937	0.999984	mlp__activation: relu mlp__alpha: 0.001 mlp__hidden_layer_sizes: (20, 30, 15) mlp__learning_rate: constant mlp__solver: adam

Tabela 34. Statystyki modeli RF, KNN i MLP dla danych z akcelerometru i żyroskopu w kierunku WZero oraz ich parametry

Model	MSE	MAE	R2	Best Parameters Found
RandomForest	0.000488	0.011433	0.999999	rf_max_depth: 10 rf_min_samples_leaf: 1 rf_min_samples_split: 2 rf_n_estimators: 36
KNN	0.064211	0.040301	0.999823	algorithm: auto n_neighbors: 2 weights: distance
MLP	0.002823	0.043232	0.999992	mlp_activation: relu mlp_alpha: 0.0001 mlp_hidden_layer_sizes: (10, 5) mlp_learning_rate: constant mlp_solver: adam

Tabela 35. Statystyki modeli RF, KNN i MLP dla danych z akcelerometru i żyroskopu w kierunku MZero oraz ich parametry

Najlepsze wyniki dla kierunku WZero (Tabela 34) uzyskał model RF (MSE=0.000768°, MAE=0.014571°), osiągając najniższy poziom błędów zarówno w ujęciu średniokwadratowym, jak i bezwzględny. Dla kierunku MZero (Tabela 35) najniższe wartości błędów uzyskał model MLP (MSE = 0.000488°, MAE = 0.011433°).

3.6.3 Wyniki estymacji dla danych z ACC i GYRO i modeli, powstałych na bazie ACC i GYRO

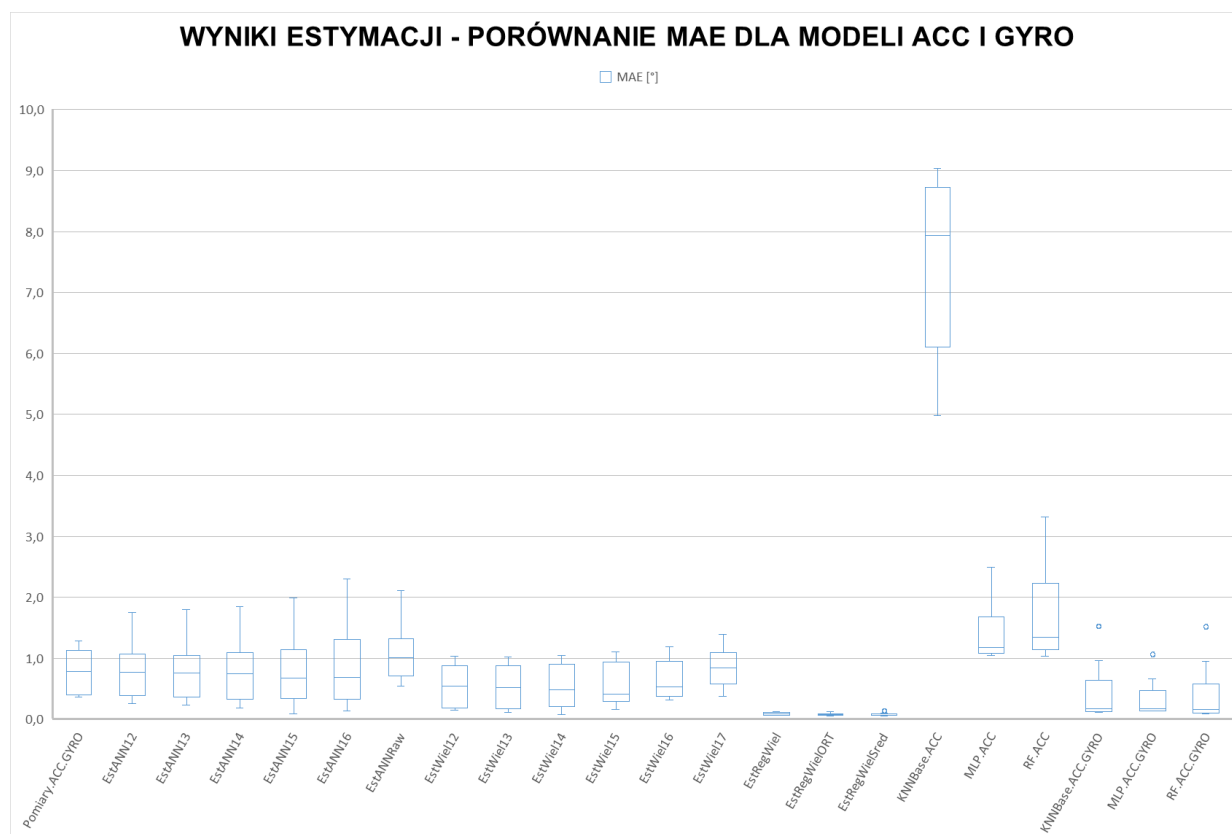
Z wykorzystaniem wcześniej wyznaczonych modeli matematycznych powstałych na bazie badań opisanych w rozdziałach 3.2, 3.3 oraz 3.5 oraz modeli wyznaczonych na bazie pomiarów ACC i GYRO dokonano estymacji pomiarów kąta wyznaczonego na podstawie wskazań akcelerometru i żyroskopu.

Wyniki estymacji dla danych z ACC i GYRO i modeli, powstałych na bazie ACC i GYRO przedstawiono w tabeli Tabela 91. Ze względu na rozmiar tabeli została ona umieszczona w sekcji z załącznikami. Poniżej przedstawiono wyniki na wykresach porównujących błędy MAE poszczególnych modeli i pomiarów.

Modele regresji wielomianowej EstRegWielORT, EstRegWielSred, EstRegWiel – osiągają najlepsze wyniki ze wszystkich metod, średnie MAE to tylko 0.078–0.088°, a wartości są bardzo stabilne (niskie odchylenia standardowe). To najdokładniejsze modele w zestawieniu.

W modelach estymacji wielomianowej (EstWiel) EstWiel12–17 – MAE rośnie wraz z prędkością kątową: od ok. 0.52° (EstWiel13–14) do 0.84° (EstWiel17). Modele EstANN (sieci neuronowe) EstANN12–16 – wszystkie oscylują wokół 0.78–0.87°. Model EstANNRaw osiąga gorszy wynik z MAE średnio 1.07°. Model stabilny, ale jego dokładność niższa niż w EstWiel czy RegWiel. Modele MLP (sieci neuronowe wielowarstwowe): MLP.ACC – błąd średni 1.41°, dość duży. MLP.ACC.GYRO – znacznie lepiej, 0.33°. Włączenie danych z żyroskopu znacząco poprawia dokładność tych modeli. Modele RF (Random Forest): RF.ACC – wysokie MAE, średnio 1.67°, czyli jeden z najgorszych wyników, RF.ACC.GYRO – dużo lepiej, 0.38°. Podobnie jak w MLP z

danymi ACC+GYRO włączenie pomiarów z żyroskopu w modelu RF także znacznie poprawiło wyniki. W modelach KNN: KNNBase.ACC – zdecydowanie najgorszy model, MAE aż 7.46° . Natomiast KNNBase.ACC.GYRO – ogromna poprawa, średnie MAE spada do 0.41° . Połączenie z żyroskopem radykalnie poprawia wynik. Poniżej znajduje się wykres porównujący wszystkie modele:

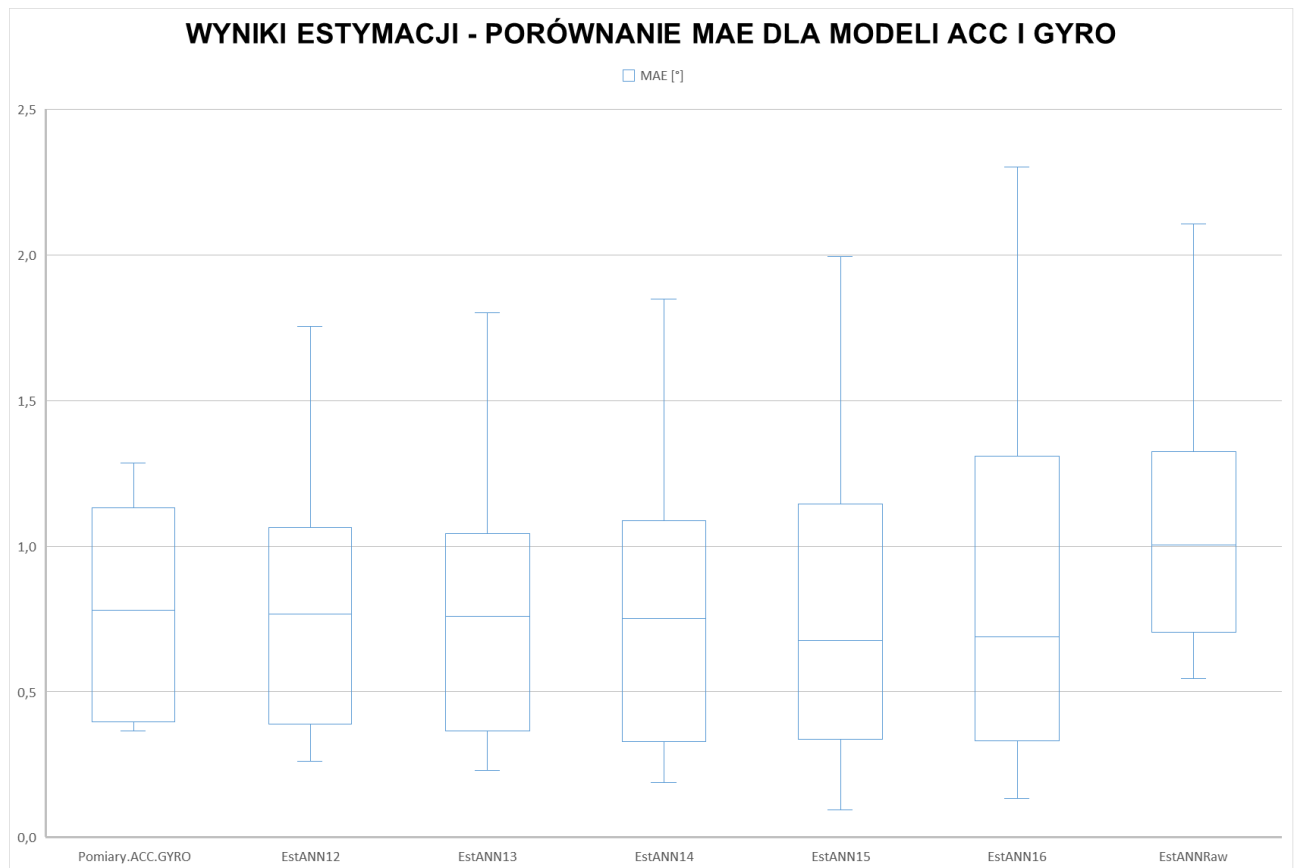


Rys. 39. Wykres błędów MAE estymacji modeli dla danych z ACC i GYRO

W grupie modeli sieci neuronowych poszczególne modele prezentują się następująco:

- EstANN12 – średnia 0.80° , mediana 0.67° , std 0.47° , zakres $0.26\text{--}1.75^\circ$.
- EstANN13 – średnia 0.79° , mediana 0.71° , std 0.49° , zakres $0.23\text{--}1.80^\circ$.
- EstANN14 – średnia 0.79° , mediana 0.65° , std 0.52° , zakres $0.19\text{--}1.85^\circ$.
- EstANN15 – średnia 0.79° , mediana 0.65° , std 0.59° , zakres $0.09\text{--}2.00^\circ$.
- EstANN16 – średnia 0.87° , mediana 0.72° , std 0.70° , zakres $0.13\text{--}2.30^\circ$.
- EstANNRaw – średnia 1.07° , mediana 0.91° , std 0.48° , zakres $0.55\text{--}2.11^\circ$.

Dokładność w porównaniu z pomiarami przeciętna, większe rozrzuty wyników. Porównanie modeli z tej grupy zaprezentowano na poniższym wykresie:

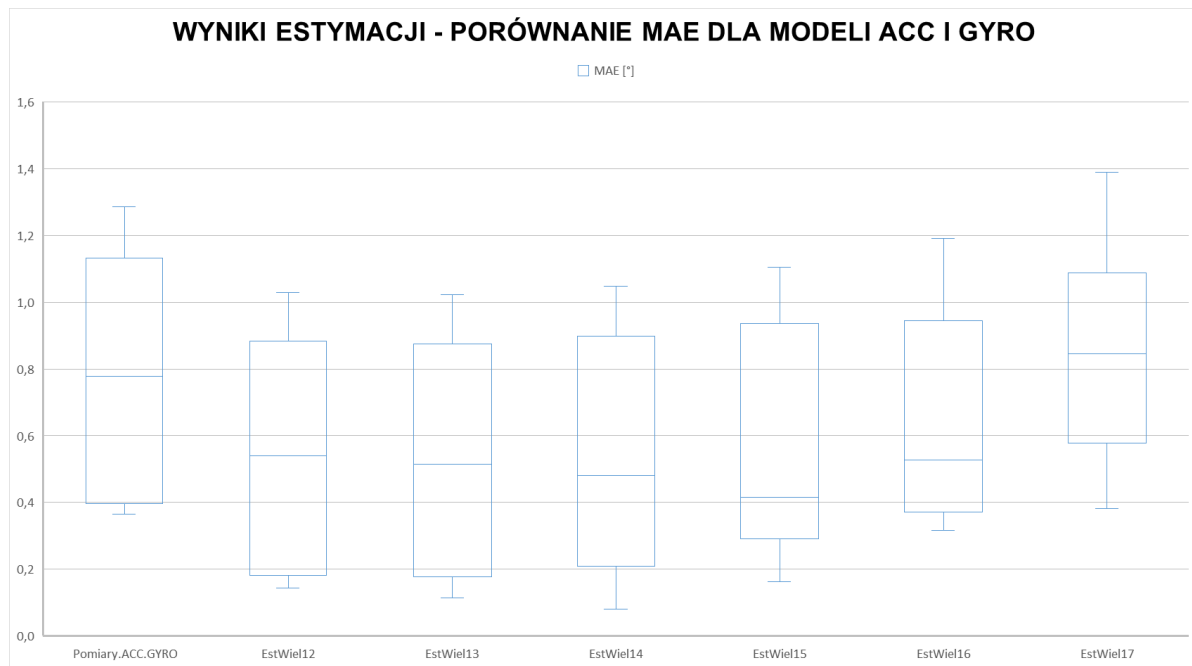


Rys. 40. Wykres błędów MAE estymacji modeli z grupy EstANN dla danych z ACC i GYRO

W grupie modeli regresji wielomianowej poszczególne modele prezentują się następująco:

- EstWiel12 – średnia 0.53° , mediana 0.49° , std 0.35° , zakres $0.14\text{--}1.03^\circ$.
- EstWiel13 – średnia 0.52° , mediana 0.47° , std 0.35° , zakres $0.11\text{--}1.02^\circ$.
- EstWiel14 – średnia 0.52° , mediana 0.50° , std 0.36° , zakres $0.08\text{--}1.05^\circ$.
- EstWiel15 – średnia 0.57° , mediana 0.54° , std 0.35° , zakres $0.16\text{--}1.11^\circ$.
- EstWiel16 – średnia 0.64° , mediana 0.56° , std 0.33° , zakres $0.32\text{--}1.19^\circ$.
- EstWiel17 – średnia 0.84° , mediana 0.88° , std 0.33° , zakres $0.38\text{--}1.39^\circ$.

Porównanie modeli z tej grupy zaprezentowano na poniższym wykresie:

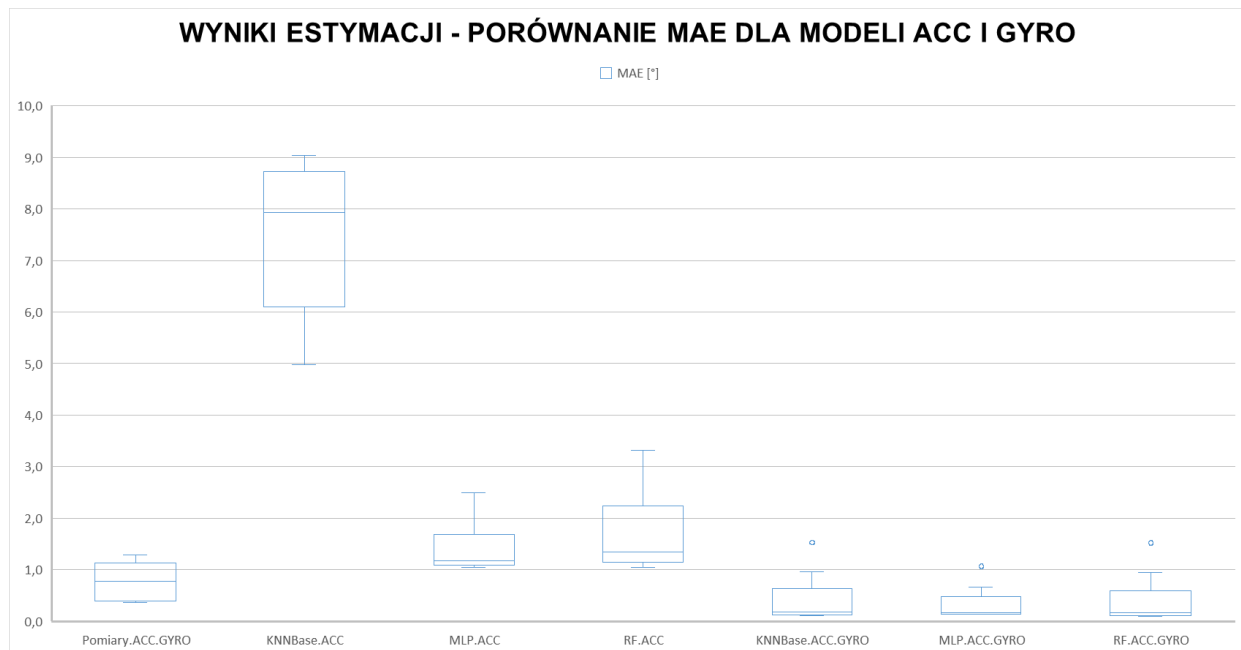


Rys. 41. Wykres błędów MAE estymacji modeli z grupy EstWiel dla danych z ACC i GYRO

W grupie modeli MLP, RF i KNN poszczególne modele prezentują się następująco:

- MLP.ACC – średnia 1.41° , mediana 1.25° , std 0.50° , zakres $1.04\text{--}2.50^\circ$.
- MLP.ACC.GYRO – średnia 0.33° , mediana 0.22° , std 0.32° , zakres $0.13\text{--}1.06^\circ$.
- RF.ACC – średnia 1.67° , mediana 1.40° , std 0.78° , zakres $1.04\text{--}3.31^\circ$.
- RF.ACC.GYRO – średnia 0.38° , mediana 0.24° , std 0.51° , zakres $0.09\text{--}1.52^\circ$.
- KNNBase.ACC – średnia 7.46° , mediana 7.61° , std 1.43° , zakres $4.98\text{--}9.04^\circ$.
- KNNBase.ACC.GYRO – średnia 0.41° , mediana 0.22° , std 0.49° , zakres $0.11\text{--}1.52^\circ$.

W każdym z tych modeli widoczna jest poprawa po dodaniu danych z żyroskopu. Porównanie modeli z tej grupy zaprezentowano na poniższym wykresie:

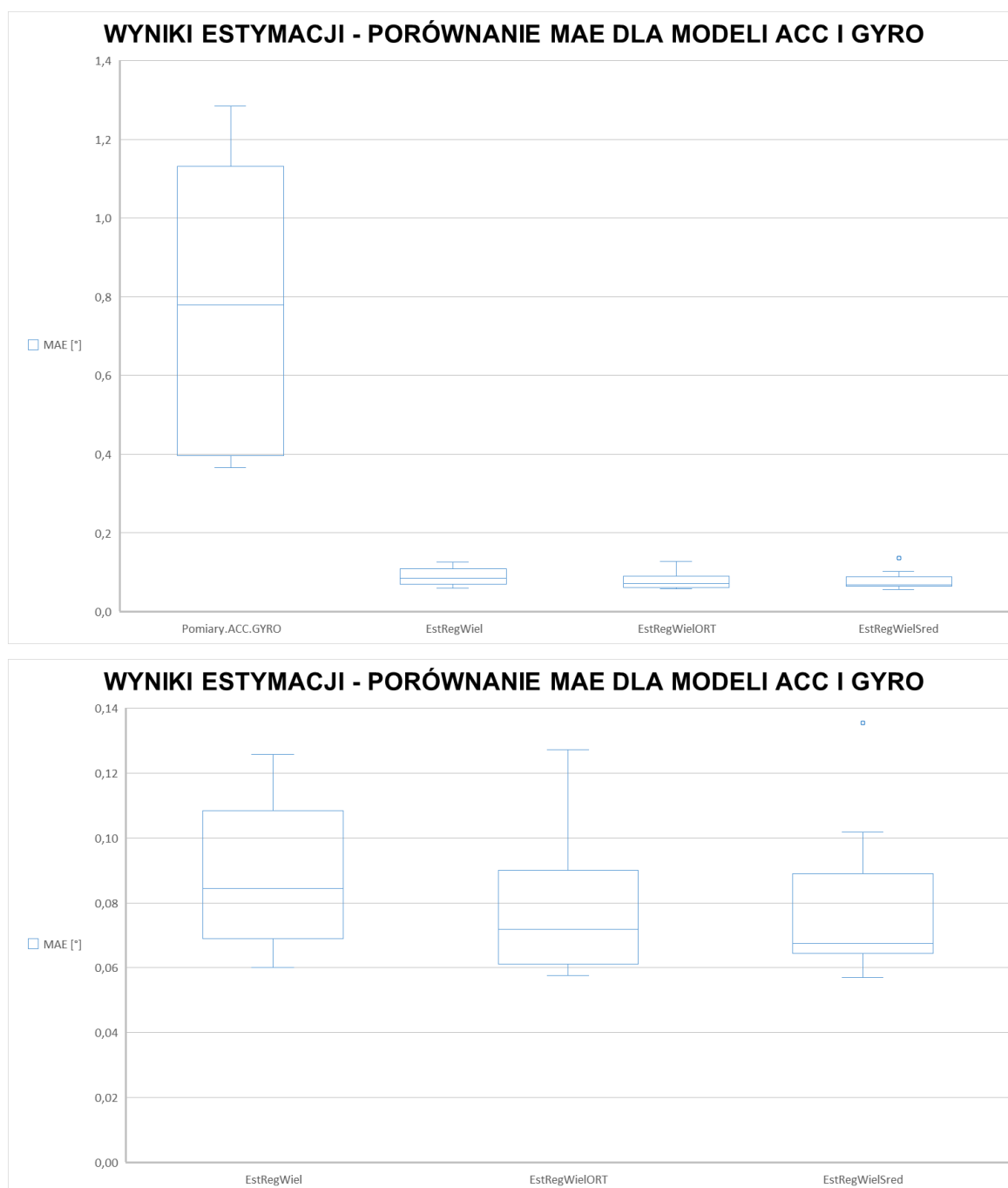


Rys. 42. Wykres błędów MAE estymacji dla danych z ACC i GYRO modeli MLP, RF i KNN uwzględniających prędkość kątową

W grupie modeli regresji wielomianowej z uwzględnieniem prędkości kątowej poszczególne modele prezentują się następująco:

- EstRegWielORT – średnia 0.078° , mediana 0.071° , std 0.023° , zakres $0.058\text{--}0.127^\circ$.
- EstRegWielSred – średnia 0.078° , mediana 0.070° , std 0.025° , zakres $0.057\text{--}0.136^\circ$.
- EstRegWiel – średnia 0.088° , mediana 0.087° , std 0.023° , zakres $0.060\text{--}0.126^\circ$.

Są to najdokładniejsze i najbardziej stabilne modele w całym zestawieniu. Porównanie modeli z tej grupy zaprezentowano na poniższym wykresie:

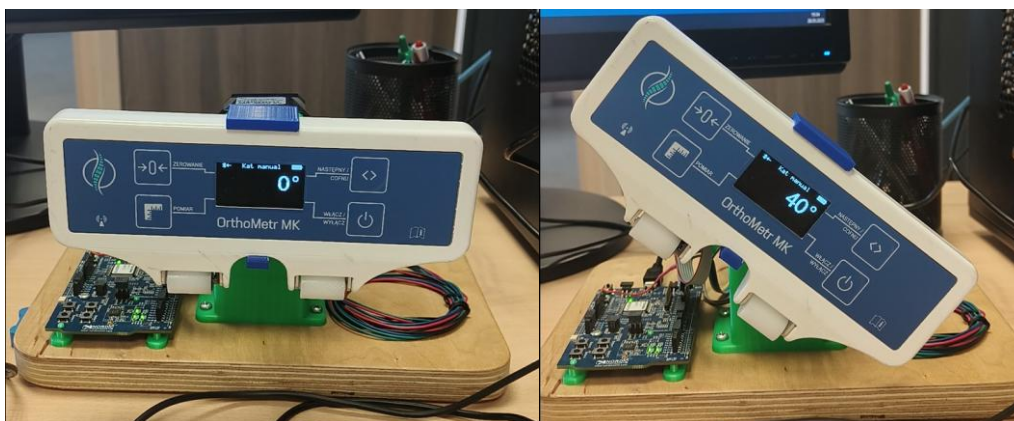


Rys. 43. Wykresy błędów MAE estymacji modeli EstRegWiel uwzględniających prędkość kątową dla danych z ACC i GYRO (wykres górny pokazuje także Pomiary.ACC.GYRO)

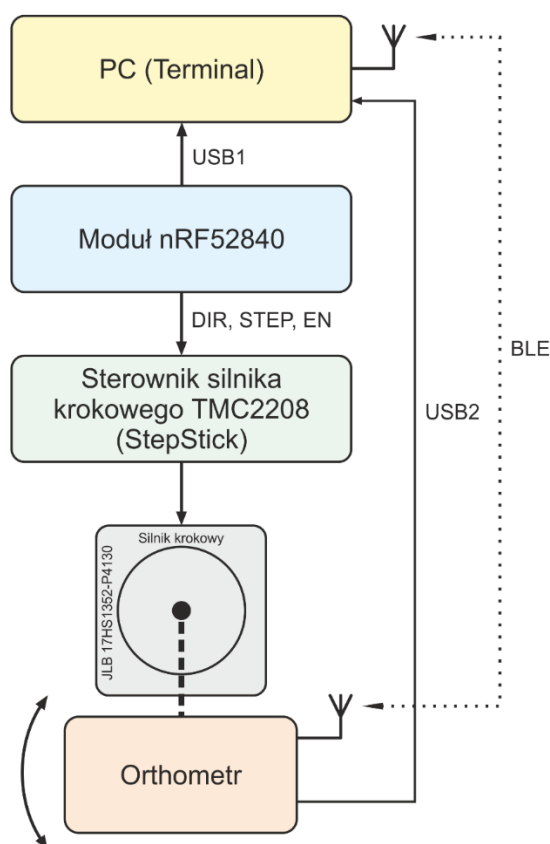
Modele regresji wielomianowej są znacząco dokładniejsze i stabilniejsze niż wyniki bazowe z Pomiary.ACC.GYRO. Zastosowanie regresji wielomianowej redukuje błąd średniokrotnie o ok. 90% i eliminuje duży rozrzut wyników.

3.7 Badania regresji na bazie pomiarów na stanowisku obrotowym ortometru

W celu przeprowadzenia badań regresji pomiarów wykonanych za pomocą prototypowej konstrukcji ortometru dokonano modyfikacji stanowiska pomiarowego opisanego w rozdziale 3.1. Elementy montażowe oraz ramię obrotowe wydrukowano na drukarce 3D. Na obrotowym ramieniu zamontowano prototyp ortometru. Schemat i zdjęcia stanowiska zamieszczono poniżej.



Rys. 44. Stanowisko obrotowe ortometru (w różnych fazach cyklu)



Rys. 45. Schemat stanowiska obrotowego ortometru

3.7.1 Przebieg badań

Przeprowadzono serie badań wykorzystując program kontrolera silnika krokowego z zestawem prędkości obrotowych opisanym w rozdziale 3.1.1 i tabeli Tabela 2. Eksperymenty wykonano dla różnych prędkości obrotowych z zakresu od 1,76 do 56,25 °/s, po kilkadziesiąt cykli dla każdej prędkości.

W przeciwieństwie do akwizycji pomiarów opisanej w rozdziale 3.1.1 dane pomiarowe z ortometru odbierane były po łączu bezprzewodowym Bluetooth LE, przez moduły komunikacyjne wykorzystywane w systemie do badań przesiewowych. Dane wzorcowe informujące o pozycji silnika krokowego były odbierane z kontrolera silnika po łączu FDDI. Odebrane dane następnie zapisywane były do plików w formacie ASCII. Zapisywane dane obejmowały:

- moment czasowy odbioru danych – Time [hh:mm:ss.ms],
- kąt wzorcowy wynikający z pozycji silnika krokowego - Step [°],
- kąt wyznaczony przez ortometr w oparciu o dane z akcelerometru - AccAngleOrt [°],
- zmienna logiczna określająca czy silnik znajduje się w ruchu – Moving.
- stan wewnętrznego licznika wysyłanych przez ortometr ramek pomiarowych.

Oprogramowanie wbudowane ortometru wysyłało ramki pomiarowe co 200ms. Dane pomiarowe oraz dane opisujące stan urządzenia i łącza transmisyjnego, które zostały zgromadzone w ramach badań wynikają bezpośrednio ze struktur danych protokołu transmisyjnego urządzenia przedstawionych poniżej:

```
// ramka danych pomiarowych
struct SOrtoDataFrame
{
    UINT16 header;          // nagłówek z numerem 0xAA01
    df_status_t status;     // Status urządzenia: tryb pracy, przyciski, podłączony czujnik
                             nacisku ...
    INT16 signal;           // [dB] Siła sygnału Bluetooth
    float f_battery;        // [V] Stan naładowania akumulatora
    float f_shake;          // [g] Przyspieszenie działające na urządzenie
    float f_roll;           // [°] Kąt główny lewo-prawo
    float f_roll_offset;    // [°] Przesunięcie kąta głównego lewo-prawo (zapamiętane po
                             naciśnięciu przycisku CAL)
    float f_tilt;           // [°] Kat pomocniczy przód-tył
    INT16 way;              // [mm] Przebyta droga zmierzona przez rolkę drogi
    UINT16 space;           // [mm] Rozsuniecie nóg urządzenia
    float f_force1;         // [N] Siła zmierzona przez czujnik nacisku nr 1
    float f_force2;         // [N] Siła zmierzona przez czujnik nacisku nr 2
    UINT16 counter;         // Licznik wysyłanych ramek
    UINT16 crc;             // Suma kontrolna CRC16
};

// ramka stanu urządzenia
struct SStatusFrame
{
```

```

UINT16 mode;           // Tryb pracy
bool b_force_det;       // Podłączony czujnik siły
bool b_batt_usb;        // Podłączone USB (ładowanie)
bool b_batt_low;        // Stan silnego rozładowania akumulatora
bool b_batt_charge;     // Trwa proces ładowania
bool b_ble_conn_err;    // Wykryto problemy z komunikacją BLE
bool b_acc_err;         // Błąd czujnika przyspieszenia i żyroskop
bool b_way_err;         // Błąd czujnika drogi
bool b_space_err;       // Błąd czujnika rozsunienia rolek
bool b_oled_err;        // Błąd komunikacji z wyświetlaczem OLED
bool b_next_btn;        // Przycisnięto przycisk: NEXT (Następny/Cofnij)
bool b_sample_btn;      // Przycisnięto przycisk: SAMPLE (Pomiar)
bool b_cal_btn;         // Przycisnięto przycisk: CAL (Zerowanie)
bool b_power_btn;       // Przycisnięto przycisk: POWER (Włącz/Wyłącz)
bool b_tmp_btn;         // Przycisnięto przycisk: TMP (nie podłączony)
bool b_next_long_btn;   // Przycisnięto długo przycisk: NEXT (Następny/Cofnij)
bool b_sample_long_btn; // Przycisnięto długo przycisk: SAMPLE (Pomiar)
bool b_cal_long_btn;    // Przycisnięto długo przycisk: CAL (Zerowanie)
bool b_power_long_btn;  // Przycisnięto długo przycisk: POWER (Włącz/Wyłącz)
bool b_tmp_long_btn;    // Przycisnięto długo przycisk: TMP (nie podłączony)
};

```

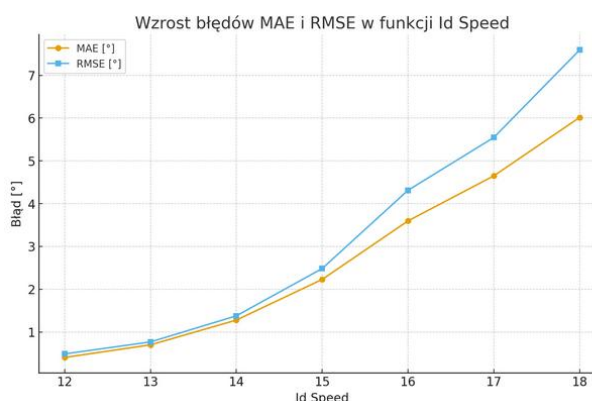
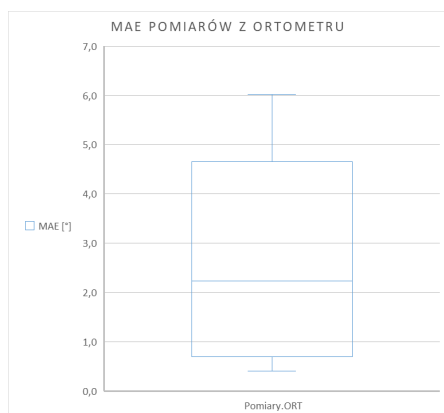
Listing 9. Struktura ramki komunikacyjnej ortometru

W poniższej tabeli przedstawiono ocenę pomiarów kąta ortometru (Pomiary.ORT) zarejestrowanych dla poszczególnych prędkości kątowych bez uwzględniania fazy ruchu:

Metoda pomiaru	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE [°]	RMSE [°]	R2	Id Speed
Pomiary.ORT	5184	7,74	11,44	25,51	46,23	-45,54	0,09815	0,40452	0,23757	0,48741	0,99963	12
	3088	7,23	10,80	25,95	45,80	-45,40	0,10078	0,69920	0,58967	0,76790	0,99911	13
	3199	7,95	11,21	26,58	45,83	-45,65	0,10407	1,27797	1,89668	1,37720	0,99726	14
	2247	7,91	10,29	27,66	46,26	-45,62	0,04749	2,22871	6,16335	2,48261	0,99178	15
	1892	8,47	11,12	29,37	46,20	-46,08	-0,09848	3,59673	18,60131	4,31292	0,97822	16
	2350	7,75	10,02	29,87	45,68	-46,90	-1,16319	4,65014	30,76856	5,54694	0,96559	17
	2333	8,06	9,68	30,75	46,04	-46,87	-1,40368	6,01658	57,67498	7,59440	0,94031	18

Tabela 36. Statystyki pomiarów kąta z ortometru na obrotowym stanowisku pomiarowym dla różnych prędkości kątowych

Wraz ze wzrostem prędkości kątowej, jakość pomiarów stopniowo się pogarsza: R^2 spada z 0.99963 do 0.94031, a MAE i RMSE rosną gwałtownie, odpowiednio MAE: z 0.40° do 6.02° a RMSE: z 0.49° do 7.59° .



Rys. 46. Wykresy błędów MAE pomiarów z ortometru na obrotowym stanowisku pomiarowym dla różnych prędkości kątowych

Pomiary.ORT zachowują bardzo wysoką precyzję do prędkości kątowej ok 14°/s (prędkości o indeksie 14–15). Powyżej tego progu obserwujemy gwałtowny wzrost błędów i spadek współczynnika determinacji R^2 . Oznacza to, że urządzenie traci stabilność pomiarową podczas obrotu przy wyższych prędkościach kątowych.

3.7.2 Modele wielomianowe na bazie kąta oraz prędkości kątowej wyznaczonych przez ortometr

Dla zbiorów danych pomiarowych uśrednionych wyznaczono zestaw wielomianów odwrotnych metodą opisaną w rozdziale 3.2.2.1.

WarSrSpeed	Stopień	R2	X	X^2	X^3	X^4	X^5	X^6	X^7	X^8	
Kierunek WZero											
1,88	8	9,9999E-01	3,4232E-15	3,4703E-13	-1,9938E-11	-4,0639E-10	2,2057E-08	2,0560E-07	1,5163E-05	9,8936E-01	3,7527E-01
3,61	8	9,9997E-01	-1,3850E-13	9,2557E-13	4,5668E-10	-3,0670E-09	-4,7742E-07	3,8752E-06	1,9840E-04	9,8854E-01	6,6516E-01
6,88	8	9,9988E-01	-4,0867E-13	1,3158E-12	1,3436E-09	-3,3567E-09	-1,3185E-06	2,0000E-06	4,4031E-04	9,8927E-01	1,2959E+00
13,10	8	9,9952E-01	-6,7900E-13	8,9774E-13	2,0738E-09	-9,1188E-09	-1,9141E-06	1,3772E-05	5,8690E-04	9,8622E-01	2,6367E+00
25,34	8	9,9808E-01	-2,4815E-12	-2,1053E-11	6,3424E-09	2,8970E-08	-3,7051E-06	-1,3784E-06	-8,8955E-05	9,9249E-01	5,1484E+00
30,82	8	9,9714E-01	-4,5050E-12	-6,6159E-11	1,3610E-08	1,3751E-07	-1,3622E-05	-1,1126E-04	5,0105E-03	1,0479E+00	7,1841E+00
44,90	8	9,9489E-01	-9,5445E-12	-3,0857E-10	2,2109E-08	6,7513E-07	-1,5320E-05	-4,7384E-04	3,1453E-03	1,1303E+00	1,1221E+01
Kierunek MZero											
-1,78	8	9,9999E-01	1,8600E-14	-1,7289E-12	-5,7982E-11	6,4787E-09	4,5154E-08	-5,8680E-06	2,4259E-05	9,9035E-01	-4,2941E-01
-3,53	8	9,9996E-01	1,1051E-13	9,7869E-13	-3,3130E-10	-1,8704E-09	2,8080E-07	1,3278E-06	-3,8226E-05	9,8912E-01	-7,6100E-01
-6,86	8	9,9988E-01	2,4936E-13	2,6491E-12	-7,4925E-10	-8,1555E-09	6,5628E-07	6,7274E-06	-1,4601E-04	9,8854E-01	-1,4106E+00
-12,95	8	9,9953E-01	1,3107E-12	-1,6065E-12	-4,4044E-09	3,2327E-09	4,5469E-06	-2,2062E-06	-1,4534E-03	9,9001E-01	-2,5790E+00
-25,15	8	9,9776E-01	2,3429E-12	-3,2234E-12	-7,3943E-09	-3,3906E-09	7,6469E-06	2,3965E-06	-2,8068E-03	9,9341E-01	-4,7090E+00
-33,26	8	9,9599E-01	-1,7172E-13	5,4484E-11	2,6660E-09	-1,7893E-07	-4,6207E-06	1,5916E-04	2,0388E-03	9,5697E-01	-5,7195E+00
-47,15	8	9,9322E-01	2,5098E-12	1,3930E-10	-4,4910E-09	-4,7045E-07	1,0952E-06	4,3445E-04	4,8918E-04	8,8292E-01	-8,6259E+00

Tabela 37. Wielomiany odwrotne wyznaczone dla poszczególnych prędkości kątowych na zbiorze pomiarów z ortometru

Powyższe wielomiany zastosowano do estymacji pomiaru. Wyniki i statystyki estymacji znajdują się poniżej dla poszczególnych kierunków ruchu.

Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
WZero	1,88	0,28	3,90	ObrotORTSpeed12PwrNU_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	1573,00	0,08	0,08	0,03	45,33	-45,47	47,07	-0,39	0,40	0,40	1,00	1,00		
Estymacja	1573,00	0,46	0,46	0,03	45,31	-44,68	46,65	0,00	0,08	0,08	1,00	1,00		
Poprawa [%]	0,00	-494,08	-491,36	0,90	0,04	1,74	0,90	100,00	79,95	79,17	0,00	0,00		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
WZero	3,61	0,30	7,55	ObrotORTSpeed13PwrNU_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	950,00	-1,12	-1,12	0,03	45,37	-45,38	37,20	-0,70	0,70	0,70	1,00	1,00		
Estymacja	950,00	-0,42	-0,42	0,03	45,53	-44,45	36,93	0,00	0,12	0,13	1,00	1,00		
Poprawa [%]	0,00	62,34	62,37	0,69	-0,37	2,04	0,74	100,00	82,19	81,75	0,00	0,00		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
WZero	6,88	0,15	14,90	ObrotORTSpeed14PwrNU_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	975,00	-0,69	-0,68	0,06	45,42	-45,64	68,69	-1,34	1,34	1,35	1,00	1,00		
Estymacja	975,00	0,66	0,66	0,06	45,99	-44,27	68,17	0,00	0,24	0,24	1,00	1,00		
Poprawa [%]	0,00	196,07	196,61	0,58	-1,24	2,99	0,76	100,00	82,48	82,02	0,00	0,00		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
WZero	13,10	0,70	32,90	ObrotORTSpeed15PwrNU_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	640,00	-1,90	-1,90	0,11	45,56	-45,53	78,09	-2,67	2,67	2,68	1,00	0,99		
Estymacja	640,00	0,76	0,77	0,11	46,36	-43,22	77,20	0,00	0,47	0,49	1,00	0,99		
Poprawa [%]	0,00	140,17	140,31	0,54	-1,76	5,08	1,15	99,99	82,21	81,77	0,00	0,02		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
WZero	25,34	1,40	60,75	ObrotORTSpeed16PwrNU_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	459,00	-2,19	-2,18	0,33	46,20	-46,08	156,93	-5,01	5,01	5,04	1,00	0,96		
Estymacja	459,00	2,82	2,83	0,34	44,77	-43,80	160,53	-0,01	0,94	0,97	1,00	0,96		
Poprawa [%]	0,00	228,68	230,24	-3,15	3,11	4,94	-2,29	99,88	81,30	80,66	0,02	0,19		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
WZero	30,82	0,28	66,35	ObrotORTSpeed17PwrNU_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	545,00	-5,95	-5,96	0,55	44,02	-46,62	271,49	-7,39	7,39	7,43	1,00	0,92		
Estymacja	545,00	1,43	1,43	0,58	44,68	-43,28	285,26	-0,01	1,25	1,33	1,00	0,91		
Poprawa [%]	0,00	124,02	124,00	-6,15	-1,50	7,18	-5,07	99,86	83,06	82,13	0,04	0,64		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
WZero	44,90	0,85	118,40	ObrotORTSpeed18PwrNU_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	476,00	-7,14	-7,12	0,95	43,52	-45,53	347,53	-10,71	10,71	10,78	1,00	0,83		
Estymacja	476,00	3,52	3,55	1,08	46,09	-41,09	405,24	-0,05	1,86	2,00	0,99	0,80		
Poprawa [%]	0,00	149,29	149,80	-14,15	-5,92	9,77	-16,61	99,53	82,67	81,46	0,10	3,22		

Tabela 38. Statystyki pomiarów i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości większych od zera – pomiary z ortometru.

Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-1,78	-3,95	-0,30	ObrotORTSpeed12PwrNU_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	1797,00	-0,08	-0,08	0,04	46,12	-45,34	67,60	0,41	0,42	0,42	1,00	1,00		
Estymacja	1797,00	-0,49	-0,49	0,04	45,33	-45,27	66,98	0,00	0,08	0,09	1,00	1,00		
Poprawa [%]	0,00	-485,92	-485,43	0,91	1,71	0,14	0,91	100,00	80,18	79,02	0,00	0,00		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-3,53	-7,60	-0,30	ObrotORTSpeed13PwrNU_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	1028,00	0,79	0,79	0,03	45,50	-45,29	38,76	0,75	0,75	0,75	1,00	1,00		
Estymacja	1028,00	0,04	0,04	0,03	44,62	-45,51	38,52	0,00	0,13	0,13	1,00	1,00		
Poprawa [%]	0,00	94,85	94,91	0,55	1,95	-0,48	0,61	100,00	82,91	82,44	0,00	0,00		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-6,86	-14,90	-0,28	ObrotORTSpeed14PwrNU_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	979,00	1,28	1,28	0,06	45,69	-45,41	70,58	1,40	1,40	1,41	1,00	1,00		
Estymacja	979,00	-0,12	-0,12	0,06	44,35	-45,98	69,92	0,00	0,24	0,24	1,00	1,00		
Poprawa [%]	0,00	109,69	109,74	0,73	2,93	-1,26	0,94	100,00	83,18	82,72	0,00	0,00		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-12,95	-30,35	-0,30	ObrotORTSpeed15PwrNU_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	628,00	-0,20	-0,20	0,10	45,84	-45,62	74,45	2,59	2,59	2,60	1,00	0,99		
Estymacja	628,00	-2,79	-2,79	0,10	44,27	-45,96	73,46	0,00	0,47	0,48	1,00	0,99		
Poprawa [%]	0,00	-1288,71	-1277,74	0,23	3,42	-0,73	1,33	99,99	81,98	81,58	0,00	0,01		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-25,15	-61,85	-0,30	ObrotORTSpeed16PwrNU_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	469,00	2,94	2,93	0,31	45,93	-45,47	155,89	4,75	4,75	4,78	1,00	0,97		
Estymacja	469,00	-1,81	-1,82	0,32	44,17	-44,65	158,35	0,00	1,00	1,04	1,00	0,97		
Poprawa [%]	0,00	161,54	162,06	-3,12	3,84	1,80	-1,58	99,91	79,01	78,24	0,02	0,10		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-33,26	-80,75	-0,28	ObrotORTSpeed17PwrNU_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	539,00	3,17	3,15	0,60	44,97	-46,90	293,92	5,28	5,30	5,36	1,00	0,96		
Estymacja	539,00	-2,10	-2,13	0,62	43,54	-47,13	298,19	0,01	1,37	1,45	1,00	0,96		
Poprawa [%]	0,00	166,33	167,47	-2,04	3,17	-0,50	-1,45	99,89	74,16	72,85	0,05	0,12		
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path										
MZero	-47,15	-115,60	-0,85	ObrotORTSpeed18PwrNU_MatlabNewAngleGroupAll_										
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2		
Pomiar	476,00	5,41	5,38	0,99	44,74	-46,87	388,20	8,18	8,21	8,31	0,99	0,90		
Estymacja	476,00	-2,73	-2,77	1,07	45,10	-44,78	412,73	0,04	2,00	2,16	0,99	0,89		
Poprawa [%]	0,00	150,41	151,42	-7,69	-0,79	4,45	-6,32	99,53	75,64	74,03	0,16	1,12		

Tabela 39. Statystyki pomiarów i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości mniejszych od zera – pomiary z ortometru.

Dla danych obejmujących grupy zarejestrowanych pomiarów z ortometru MAE wartości pomiarowych także rośnie z prędkością kątową i wynosi: od 0,40 do 10,71° (WZero) (Tabela 38) oraz od 0,42 do 8,21° (MZero) (Tabela 39). Wyznaczone wielomiany odwrotne dla ortometru skutecznie działają dla danej prędkości kątowej. W zależności od prędkości kątowej poprawa wartości MAE estymacji: dla kierunku WZero wynosi od 79,95% do 83,06%, dla kierunku MZero od 74,16% do 83,18%.

W związku z tym, iż zakres prędkości kątowych w powyższym modelu wielomianowym jest węższy niż w poprzednich modelach dokonano uzupełnienia tego modelu o wielomiany z macierzy modelu EstWielReg. Zmodyfikowana AORT.Zmod w ten sposób tablica wielomianów przyjęta do dalszych estymacji wygląda następująco:

```
AORT.Zmod = [ % uzupełnione o 225 113 i 55 z A
```

```
225.16, 8, 0.999995386, 6.62737E-14, 4.20702E-12, 8.73639E-10, -5.7153E-08, -2.64278E-07, 3.35635E-05, -6.7245E-06, 1.006002071, 6.41943333;
113.88, 8, 0.999996924, -4.58675E-14, -2.98185E-12, 1.08758E-10, 1.00908E-08, -1.56654E-07, -9.32325E-06, 8.95864E-05, 1.013424637, 3.337539581;
55.64, 8, 0.999997801, 5.55425E-14, -2.93362E-12, -1.39321E-10, 8.46882E-09, 7.1409E-08, -8.4573E-06, 2.03487E-05, 1.013806456, 1.771894434;
44.9025, 8, 0.994892178, -9.54448E-12, -3.08567E-10, 2.21092E-08, 6.75129E-07, -1.53198E-05, -0.000473836, 0.003145306, 1.130306577, 11.22105074;
30.81698113, 8, 0.997139954, -4.50502E-12, -6.61594E-11, 1.36097E-08, 1.37505E-07, -1.36216E-05, -0.000111264, 0.005010544, 1.047909122, 7.184108981;
25.34194915, 8, 0.998084925, -2.48151E-12, -2.10533E-11, 6.34236E-09, 2.89698E-08, -3.70514E-06, -1.37843E-06, -8.89546E-05, 0.992494115, 5.148359326;
13.0959025, 8, 0.999515337, -6.78996E-13, 8.97739E-13, 2.07376E-09, -9.11882E-09, -1.91409E-06, 1.37721E-05, 0.000586902, 0.986221853, 2.636652229;
6.878989362, 8, 0.999880251, -4.08672E-13, 1.3158E-12, 1.34363E-09, -3.35665E-09, -1.31848E-06, 2.00001E-06, 0.000440311, 0.989271307, 1.295869033;
3.6078125, 8, 0.999966344, -1.38505E-13, 9.25573E-13, 4.56682E-10, -3.06696E-09, -4.77416E-07, 3.87519E-06, 0.000198402, 0.98854105, 0.665164;
1.880128205, 8, 0.999987663, 3.42322E-15, 3.47029E-13, -1.9938E-11, -4.06385E-10, 2.20567E-08, 2.05602E-07, 1.51632E-05, 0.989358214, 0.375272199;
-1.776785714, 8, 0.999986031, 1.86003E-14, -1.72892E-12, -5.79824E-11, 6.47871E-09, 4.51536E-08, -5.86798E-06, 2.42593E-05, 0.990349547, -0.429408072;
-3.52983871, 8, 0.999960594, 1.10513E-13, 9.78685E-13, -3.31302E-10, -1.87035E-09, 2.80799E-07, 1.32777E-06, -3.82265E-05, 0.989120212, -0.760997099;
-6.862373737, 8, 0.999879419, 2.49359E-13, 2.64915E-12, -7.49254E-10, -8.15555E-09, 6.56282E-07, 6.72736E-06, -0.000146014, 0.98853845, -1.410618971;
-12.95291008, 8, 0.999525685, 1.3107E-12, -1.60653E-12, -4.40437E-09, 3.23273E-09, 4.54694E-06, -2.20622E-06, -0.001453412, 0.990008162, -2.578979788;
-25.15317164, 8, 0.997756251, 2.3429E-12, -3.22338E-12, -7.39432E-09, -3.39062E-09, 7.64689E-06, 2.39655E-06, -0.002806813, 0.99341294, -4.709043044;
-33.26490964, 8, 0.995994096, -1.71723E-13, 5.44843E-11, 2.66595E-09, -1.78929E-07, -4.62066E-06, 0.000159157, 0.00203878, 0.956967343, -5.719467579;
-47.14984848, 8, 0.993220613, 2.50985E-12, 1.39304E-10, -4.49099E-09, -4.70453E-07, 1.09518E-06, 0.000434447, 0.000489181, 0.882918078, -8.625894671;
-55.64, 8, 0.99999833, -3.79411E-14, -2.05334E-12, 1.97281E-10, 6.81951E-09, -3.18102E-07, -7.61671E-06, 0.000164858, 1.014047579, -1.634864802;
-113.88, 8, 0.999998163, -1.11021E-13, -5.54372E-12, 2.41594E-10, 1.13604E-08, -2.62587E-07, -9.10554E-06, 0.000125757, 1.013960781, -3.167312271;
-225.16, 8, 0.999993671, 5.38053E-13, 5.86622E-11, 1.10926E-09, -5.25868E-08, -1.62283E-06, 8.95301E-06, 0.000537624, 1.011184437, -6.213209665;
```

```
]
```

Listing 10. Macierz wielomianów odwrotnych AORTZmod

Następnie, tak jak w poprzednich podrozdziałach, wykorzystując metodę wyznaczenia wielomianu odwrotnego (rozdział 3.3.1.3) dla danej prędkości kątowej tym razem stworzono dwa modele regresji wielomianowej z uwzględnieniem prędkości kątowej dla danych pomiarowych z ortometru. Jeden w oparciu o wielomiany z Tabela 37 (EstRegWielORT), drugi w oparciu o macierz zmodyfikowaną AORT.Zmod z Listing 10. Macierz wielomianów odwrotnych AORTZmod (EstRegWielORT.Zmod). Efekty działania wszystkich modeli, w tym EstRegWielORT oraz EstRegWielORT.Zmod, omówionych w tym rozdziale są przedstawione w podsumowaniu wyników estymacji (patrz rozdział 3.7.4 i 3.7.5).

3.7.3 Modele RF, MLP i KNN

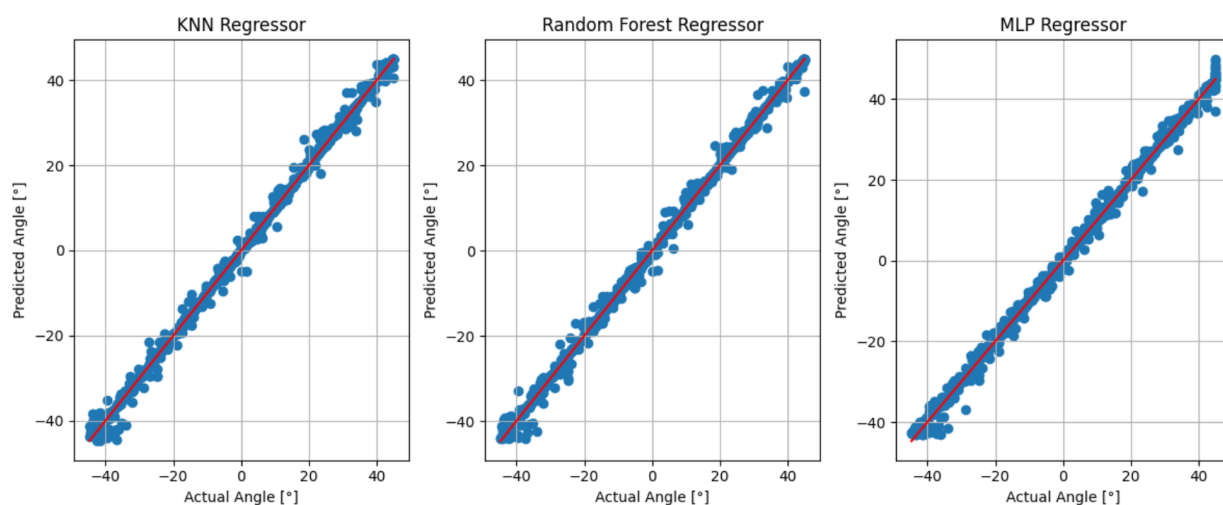
Metodą opisaną w rozdziale 3.3.2 wyznaczono modele na danych pomiarowych z ortometru. Zestawienie statystyk i parametrów wygenerowanych dla każdego kierunku znajduje się w poniższych tabelach.

Model	MSE [°]	MAE [°]	R2	Best Parameters Found
RandomForest	1,888061	0,731749	0.997322	rf_max_depth: None rf_min_samples_leaf: 20 rf_min_samples_split: 2 rf_n_estimators: 300
KNN	1.535106	0.664913	0.997822	algorithm: brute n_neighbors: 12 weights: distance
MLP	1.993241	0.844155	0.997173	mlp_activation: relu mlp_alpha: 0.0001 mlp_hidden_layer_sizes: (25, 25, 30) mlp_learning_rate: constant mlp_solver: adam
MLP2	2.072432	0.875053	0.997061	mlp_activation: relu mlp_alpha: 0.0001 mlp_hidden_layer_sizes: (20, 20) mlp_learning_rate: constant mlp_solver: adam

Tabela 40. Statystyki modeli RF, KNN i MLP dla danych z ortometru w kierunku WZero oraz ich parametry

Model	MSE [°]	MAE [°]	R2	Best Parameters Found
RandomForest	1.81661	0.713995	0.997402	rf_max_depth: None rf_min_samples_leaf: 2 rf_min_samples_split: 2 rf_n_estimators: 300
KNN	1.750364	0.695424	0.997497	algorithm: brute n_neighbors: 12 weights: distance
MLP	1.962768	0.789238	0.997194	mlp_activation: relu mlp_alpha: 0.0001 mlp_hidden_layer_sizes: (25, 15, 25) mlp_learning_rate: constant mlp_solver: adam
MLP2	1.993522	0.812578	0.997150	mlp_activation: relu mlp_alpha: 0.0001 mlp_hidden_layer_sizes: (20, 20) mlp_learning_rate: constant mlp_solver: adam

Tabela 41. Statystyki modeli RF, KNN i MLP dla danych z ortometru w kierunku MZero oraz ich parametry

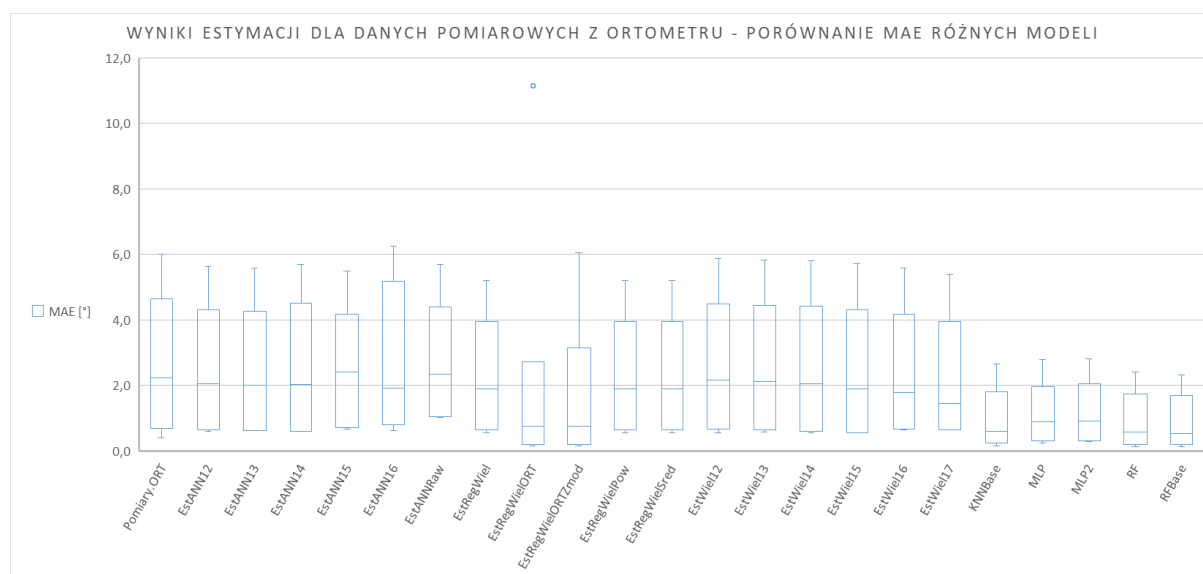


Rys. 47. Wykresy przedstawiające estymację modeli KNN, RF i MLP

3.7.4 Wyniki estymacji

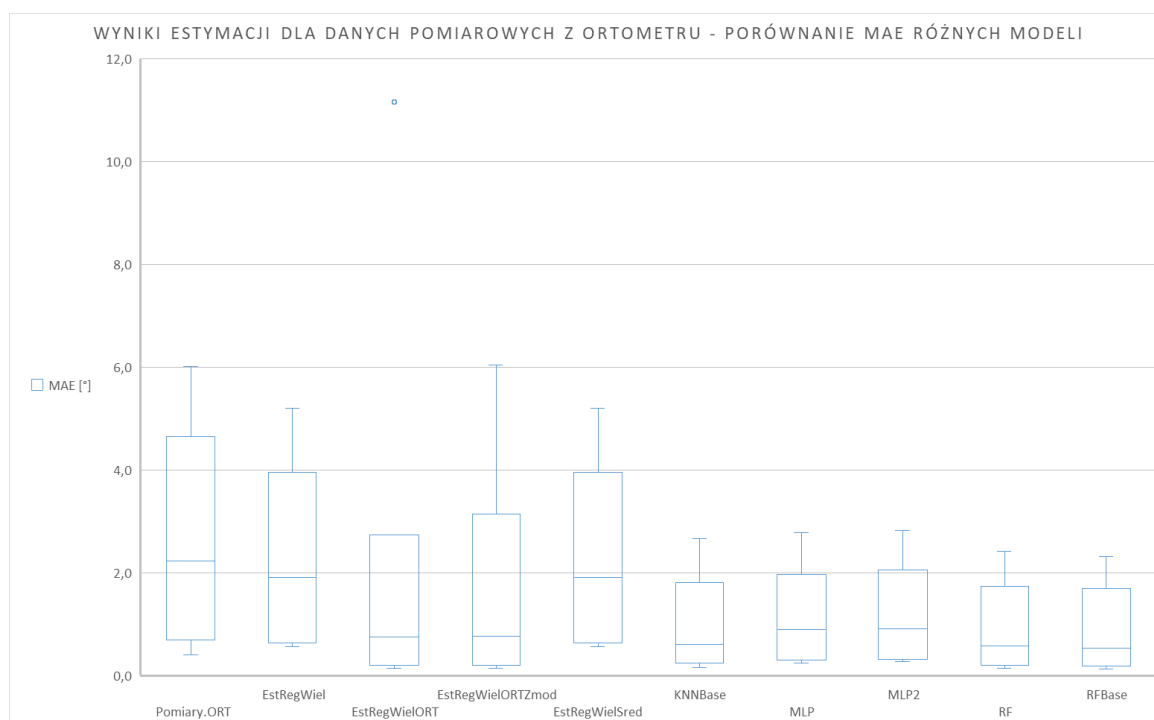
Z wykorzystaniem wcześniej wyznaczonych modeli matematycznych powstałych na bazie badań opisanych w rozdziałach 3.2, 3.3 oraz 3.5 oraz modeli wyznaczonych na bazie pomiarów na stanowisku obrotowym ortometru dokonano estymacji pomiarów kąta wyznaczonego na podstawie wskazań akcelerometru przez oprogramowanie wbudowane ortometru.

Szczegółowe wyniki estymacji dla danych pomiarowych z ortometru przedstawiono w tabeli Tabela 92. Ze względu na rozmiar tabeli została ona umieszczona w sekcji z załącznikami. Poniżej przedstawiono wyniki na wykresach porównujących błędy MAE poszczególnych modeli i pomiarów.



Rys. 48. Wykres błędów MAE estymacji modeli dla danych pomiarowych z ortometru

Modele EstANN12–14 uzyskują niższy średni błąd MAE niż Pomiary.ORT, co oznacza, że potrafią skutecznie odtwarzać pomiar. Dla wyższych numerów (EstANN15–16) błąd wzrasta, osiągając poziom zbliżony lub wyższy od ORT. Wszystkie modele EstWiel14–17 osiągają niższy średni błąd MAE niż Pomiary.ORT, co wskazuje na skuteczne dopasowanie regresji wielomianowej. EstWiel17 jest najlepszym spośród tej grupy — ma najniższy średni błąd i mniejsze odchylenie.

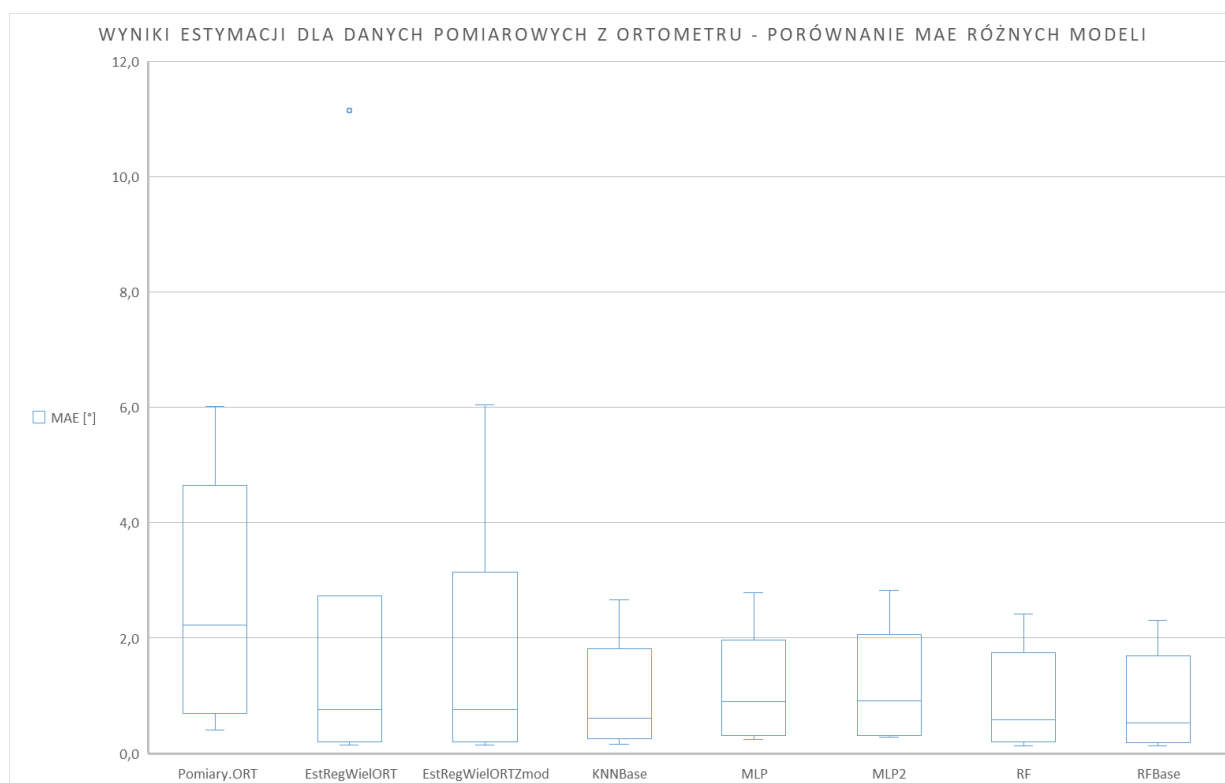


Rys. 49. Wykres błędów MAE pomiarów z ortometru na obrotowym stanowisku pomiarowym dla różnych prędkości kątowych i grupy modeli uwzględniających prędkość kątową

Wszystkie modele EstRegWiel* osiągają lepsze wyniki (mniejsze MAE) niż Pomiary.ORT. EstRegWielORTZmod jest zdecydowanie najlepszym modelem w tej grupie – ma o ponad 0,9° mniejszy średni błąd od bazowego. Modele EstRegWiel / Pow / Sred są bardzo do siebie zbliżone – ich różnice są marginalne ($<0.01^\circ$).

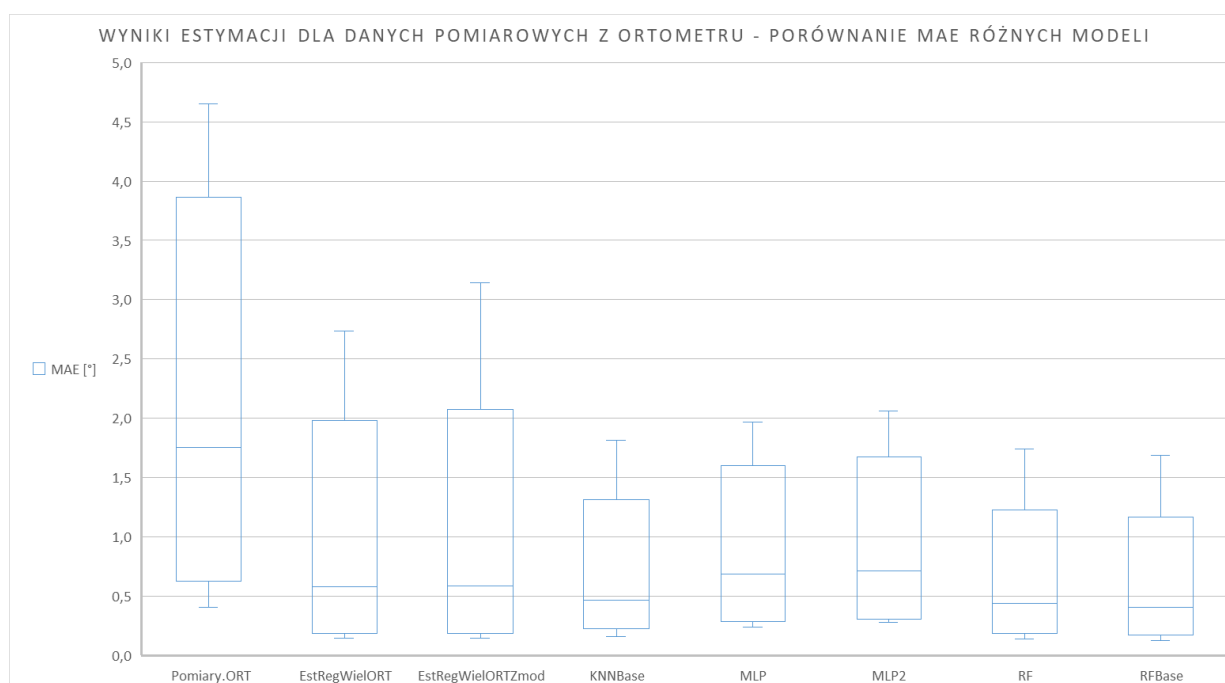
Modele RF (Random Forest) oraz RFBase są najdokładniejsze – błąd MAE mniejszy o ok. 70% względem pomiarów ORT. KNNBase również znacząco przewyższa dokładność pomiarową. MLP i MLP2 (sieci neuronowe) są skuteczne, ale mniej precyzyjne niż modele drzewiaste. Modele EstRegWielORT osiągają umiarkowaną poprawę względem pomiarów z ortometru, jednak nie dorównują RF.

Poniżej przedstawiono grupę najlepszych modeli (uwzględniających prędkość kątową), które zostały wybrane do dalszej dyskusji.



Rys. 50. Wykres błędów MAE pomiarów z ortometru na obrotowym stanowisku pomiarowym i grupy najlepszych modeli uwzględniających prędkość kątową

Poniżej przedstawiono wykresy pudełkowe dla najlepszych modeli po wykluczeniu danych obejmujących najwyższą prędkość kątową ($56,25$ [°/s], zbiór pomiarów idSpeed=18).



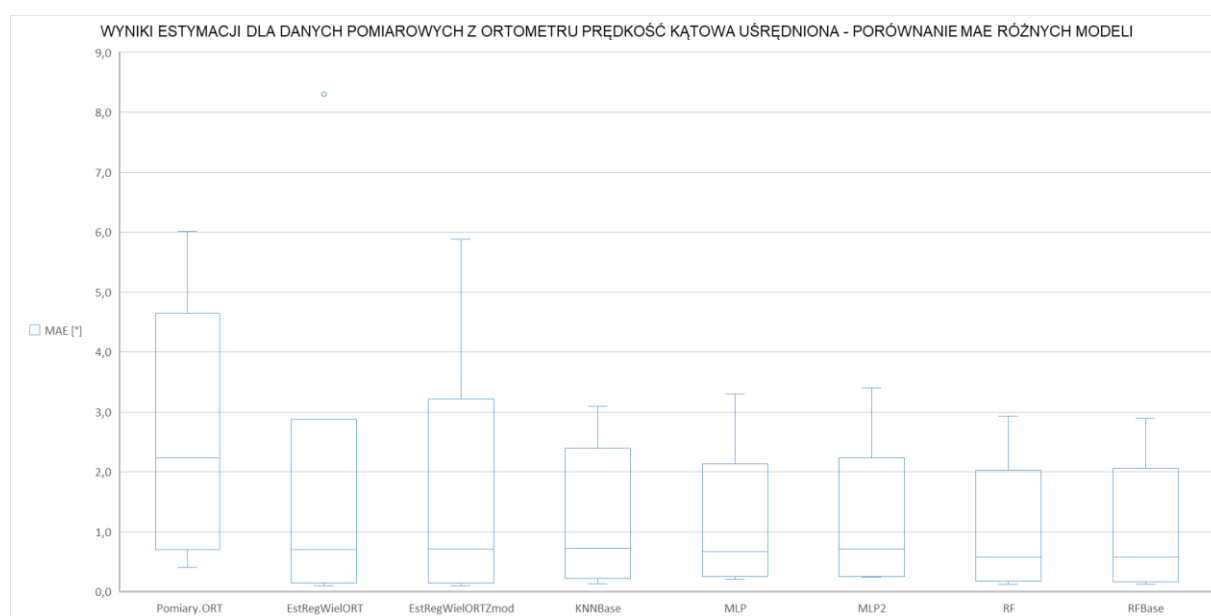
Rys. 51. Wykres błędów MAE pomiarów z ortometru na obrotowym stanowisku pomiarowym i grupy najlepszych modeli uwzględniających prędkość kątową – po wykluczeniu najwyższej prędkości kątowej

Wszystkie modele uczenia maszynowego (RF, KNN, MLP) uzyskały znacznie lepsze wyniki niż dane pomiarowe ORT. Wykluczenie prędkości 56,25 [°/s], wyraźnie poprawiło dokładność – błędy spadły o 30–40% w porównaniu z analizą pełnego zakresu. RF i RFBase pozostają najlepszymi modelami – ich MAE < 0.7°, co oznacza bardzo precyzyjne odwzorowanie pomiaru. Modele EstRegWielORT/Zmod nadal przewyższają Pomiary.ORT, ale dają gorsze wyniki niż modele oparte na drzewach decyzyjnych.

3.7.5 Wyniki estymacji – uśrednione pomiary prędkości kątowej

Dokonano uśrednienia prędkości kątowej wyznaczonej na podstawie pomiarów z ortometru i dokonano estymacji dla modeli wyznaczonych na stanowisku obrotowym ortometru, których parametrem wejściowym jest wartość prędkości kątowej.

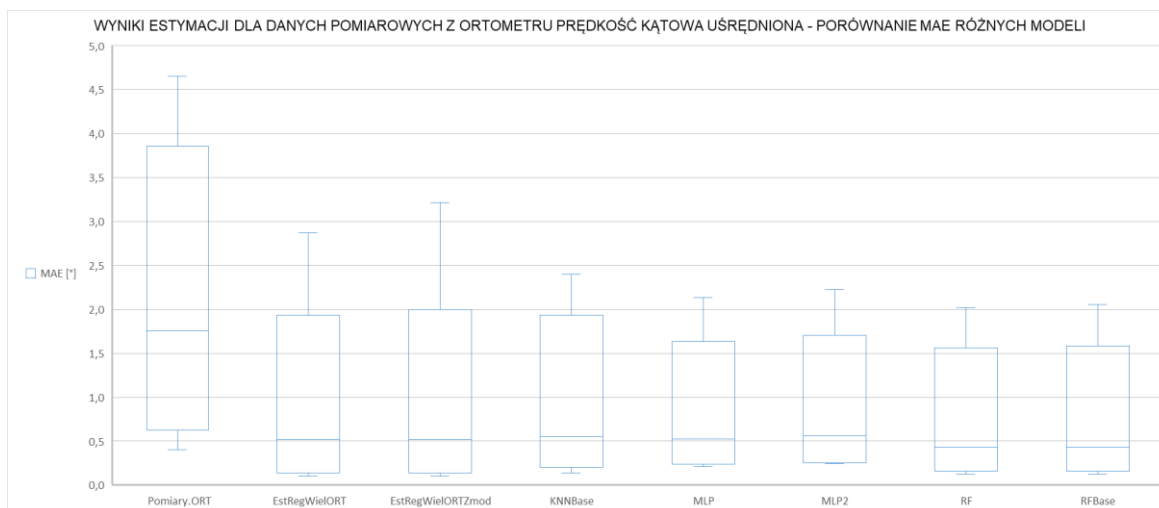
Wyniki estymacji dla danych uśrednionych pomiarów prędkości kątowej z ortometru przedstawiono w tabeli Tabela 93, która została umieszczona w sekcji z załącznikami. Poniżej przedstawiono wyniki na wykresach porównujących błędy MAE poszczególnych modeli i pomiarów.



Rys. 52. Wykres błędów MAE pomiarów z ortometru na obrotowym stanowisku pomiarowym i grupy najlepszych modeli uwzględniających uśrednioną prędkość kątową

Uśrednienie prędkości kątowej na stanowisku obrotowym ortometru nie wpłynęło na znaczącą poprawę wyników najlepszych modeli – a wręcz ich pogorszenie. Najbardziej stabilne w całym zakresie prędkości kątowych okazały się modele lasu losowego RF.

Poniżej przedstawiono wykresy pudełkowe dla najlepszych modeli po wykluczeniu danych obejmujących najwyższą prędkość kątową.

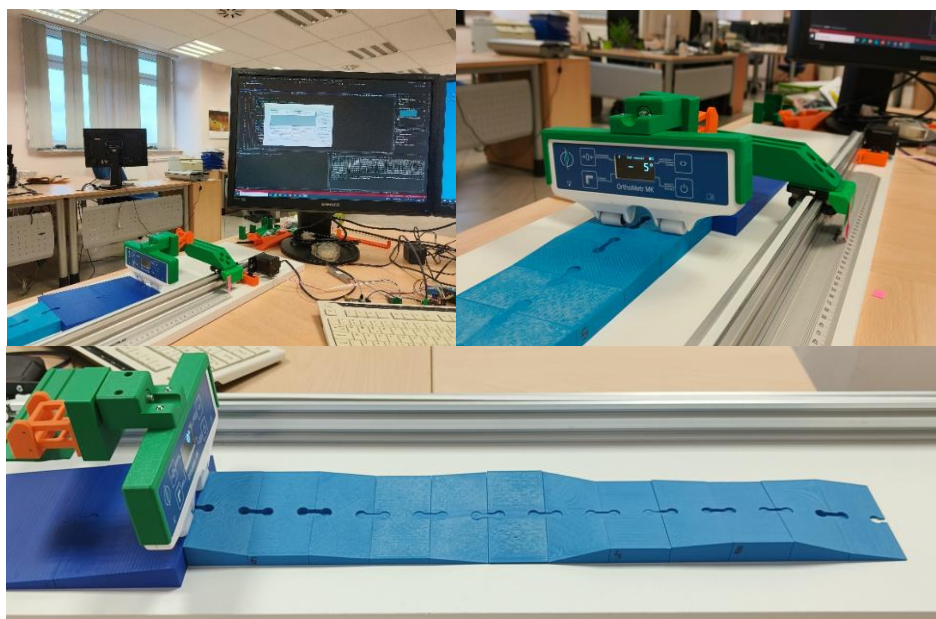


Rys. 53. Wykres błędów MAE pomiarów z ortometru na obrotowym stanowisku pomiarowym i grupy najlepszych modeli uwzględniających uśrednioną prędkość kątową – po wykluczeniu najwyższej prędkości kątowej

Wykluczenie najwyższej prędkości kątowej po uśrednieniu prędkości kątowej na stanowisku obrotowym ortometru także nie wpłynęło na znaczącą poprawę wyników najlepszych modeli w stosunku do danych nieuśrednionych – a wręcz ich pogorszenie.

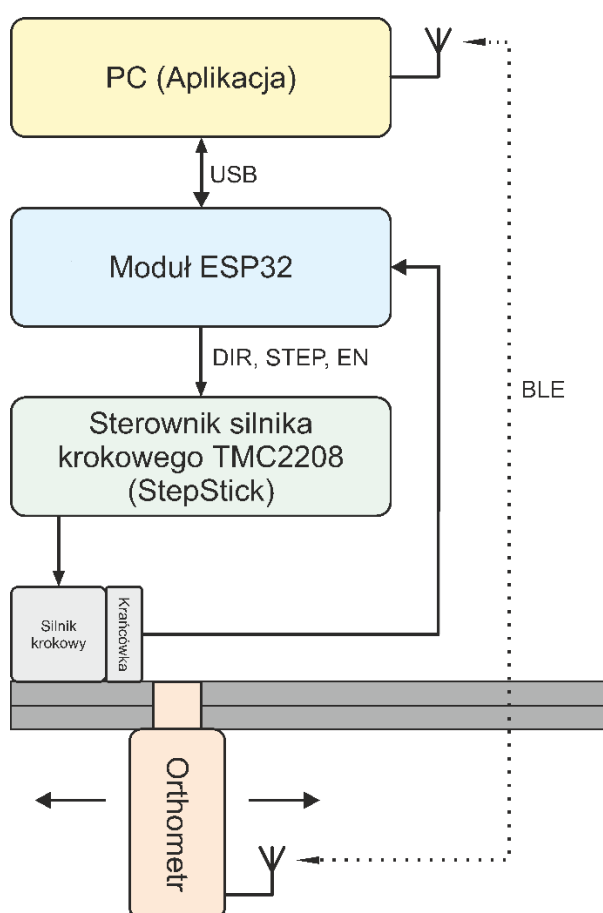
3.8 Badania na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji kręgosłupa

Następny etap badawczy polegał na ocenie zastosowanych w ortometrze rozwiązań pomiarowych z wykorzystaniem stanowiska testowego składającego się z ruchomego ramienia napędzanego silnikiem krokowym zmieniającym liniowo położenie ortometru zamontowanego na specjalnym uchwycie. Stanowisko pomiarowe symuluje ruch ręki podczas badania kręgosłupa ortometrem.



Rys. 54. Stanowisko symulujące ruch ortometru podczas badania.

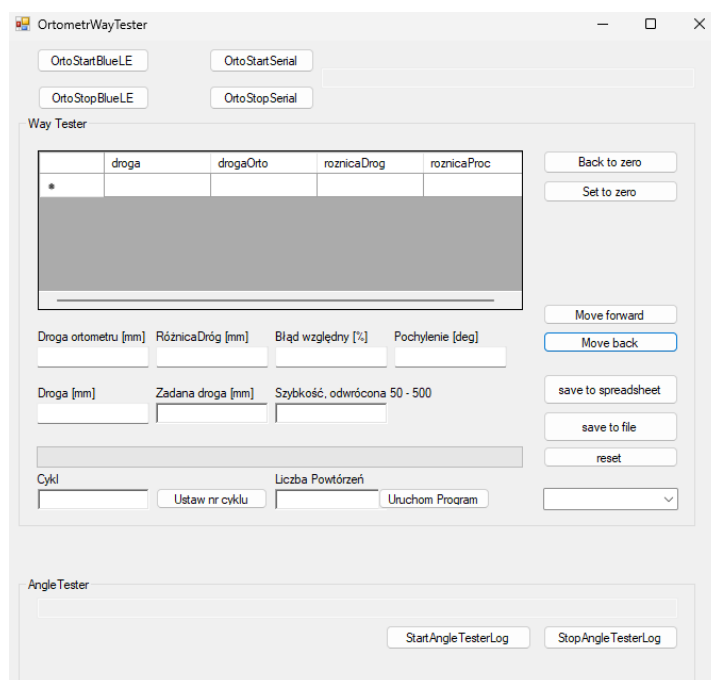
Zaprojektowano i wydrukowano elementy do konstrukcji uchwytu i ramienia ortometru. Opracowano oprogramowanie kontrolera silnika sterujące ruchem liniowym ramienia poprzez zadanie prędkości silnika krokowego oraz liczbę kroków. Oprogramowanie wykorzystuje timery sprzętowe do generacji sygnałów krokowych silnika. Kontroler odbiera komendy z portu szeregowego, za jego pomocą wysyła także informacje o aktualnej pozycji silnika krokowego. Komendy sterujące pozwalają ustawić kierunek obrotu, zadać liczbę kroków i prędkość (czas pomiędzy krokami), rozpocząć lub zatrzymać ruch, przeprowadzić kalibrację (np. dojazd do krańcówki). Dioda LED sygnalizuje działanie silnika. Czujnik krańcowy zabezpiecza mechanizm, w przypadku jego osiągnięcia ruch jest blokowany.



Rys. 55. Schemat stanowiska pomiarowego drogi

Opracowano aplikację PC sterującą pracą stanowiska poprzez wysyłanie portem szeregowym odpowiednich komend do sterownika silnika krokowego. Bezprzewodowym torem transmisyjnym aplikacja ma możliwość odbioru i rejestracji danych pomiarowych od ortometru, dzięki czemu możliwe jest porównanie parametrów zadanych i zmierzonych. Aplikacja pozwala na wykonanie zadanej liczby powtórzeń cyklu pomiarowego z określoną prędkością liniową i

długością odcinka. Informacje o przebiegu badania, aktualnej prędkości, pozycji silnika oraz odebrane dane pomiarowe z ortometru zapisywane są do plików.

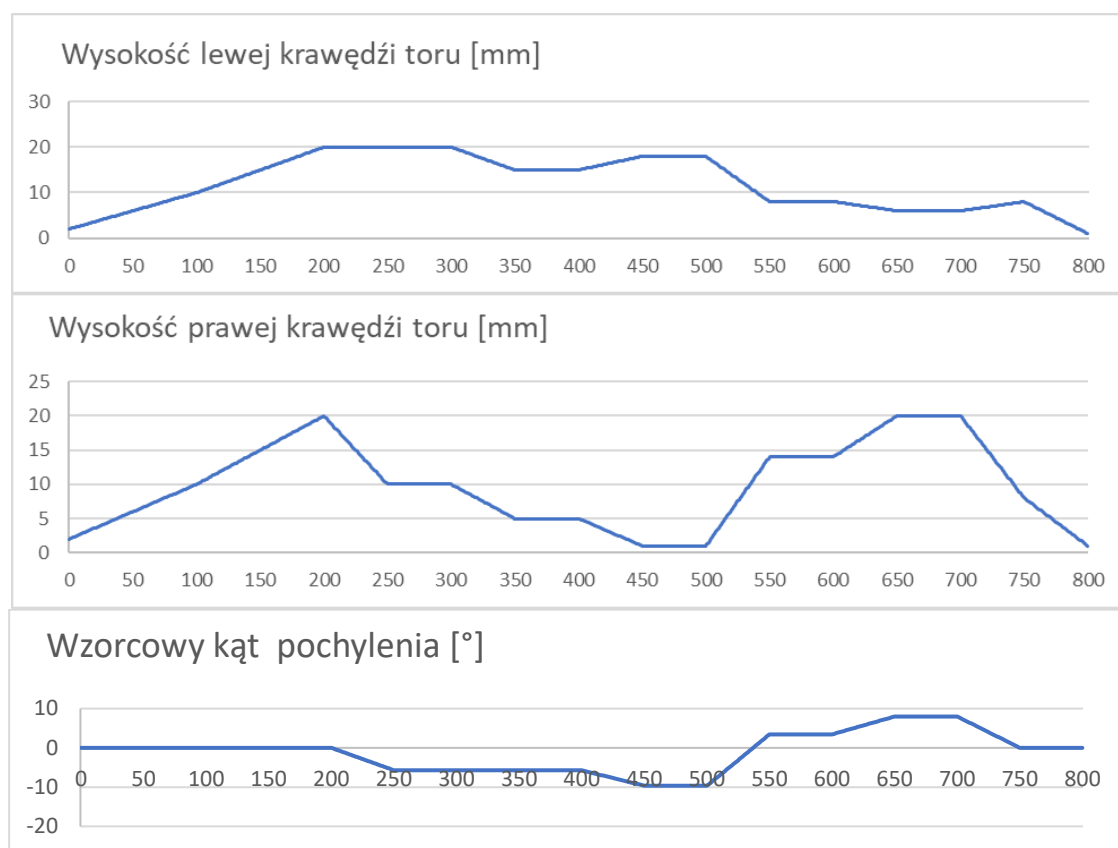


Rys. 56. Okno aplikacji sterującej stanowiska pomiarowego drogi i kątów

Stanowisko umożliwia ocenę wskazań czujnika wykorzystanego do pomiaru długości kręgosłupa oraz wpływu na jakość pomiaru siły nacisku, rodzaju materiału z którego wykonana jest rolka pomiarowa ortometru oraz wilgotności podłoża. Dodatkowo możliwe było dokonanie weryfikacji pomiaru drogi na powierzchni płaskiej na różnych podłożach oraz pomiaru kątów w zależności od ruchu ramienia na specjalnej konstrukcji z elementów wydrukowanych na drukarce 3D. Znana szczegółowa geometria toru o zmiennym kącie nachylenia, pozwoliła ocenić wykorzystanie skalibrowanych pomiarów z ortometru do dalszej analizy w algorytmie detekcji skoliozy. Model wzorcowego toru, po którym poruszał się ortometr przedstawiał się następująco:



Rys. 57. Model 3D wzorcowego toru dla stanowiska badawczego pomiaru drogi i kąta rotacji



Rys. 58. Parametry wzorcowego toru dla stanowiska badawczego pomiaru drogi [mm] i kąta rotacji [°] w zależności od drogi [mm]

3.8.1 Przebieg badań

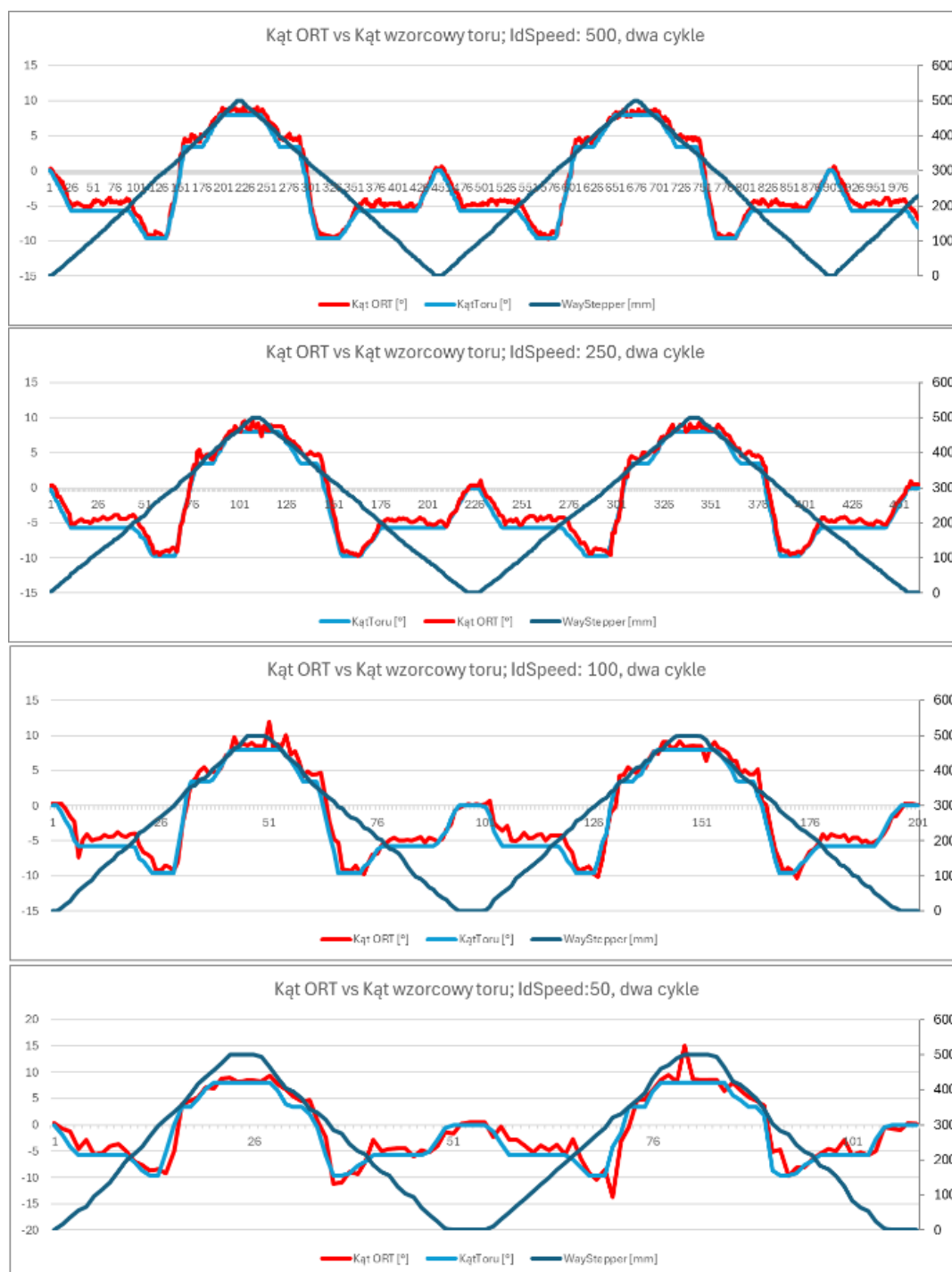
Wykonano serie pomiarów na torze wzorcowym, po kilkanaście cykli ruchu ramienia z zamontowanym ortometrem, tam i z powrotem, z różnymi prędkościami liniowymi. Ruchem ramienia sterowała opracowana aplikacja, która zapisywała do plików dane pomiarowe pochodzące z ortometru oraz pozycję i prędkość ramienia.

Oprogramowanie sterujące pozwalało na przeprowadzenie badania jedną z następujących prędkości liniowych:

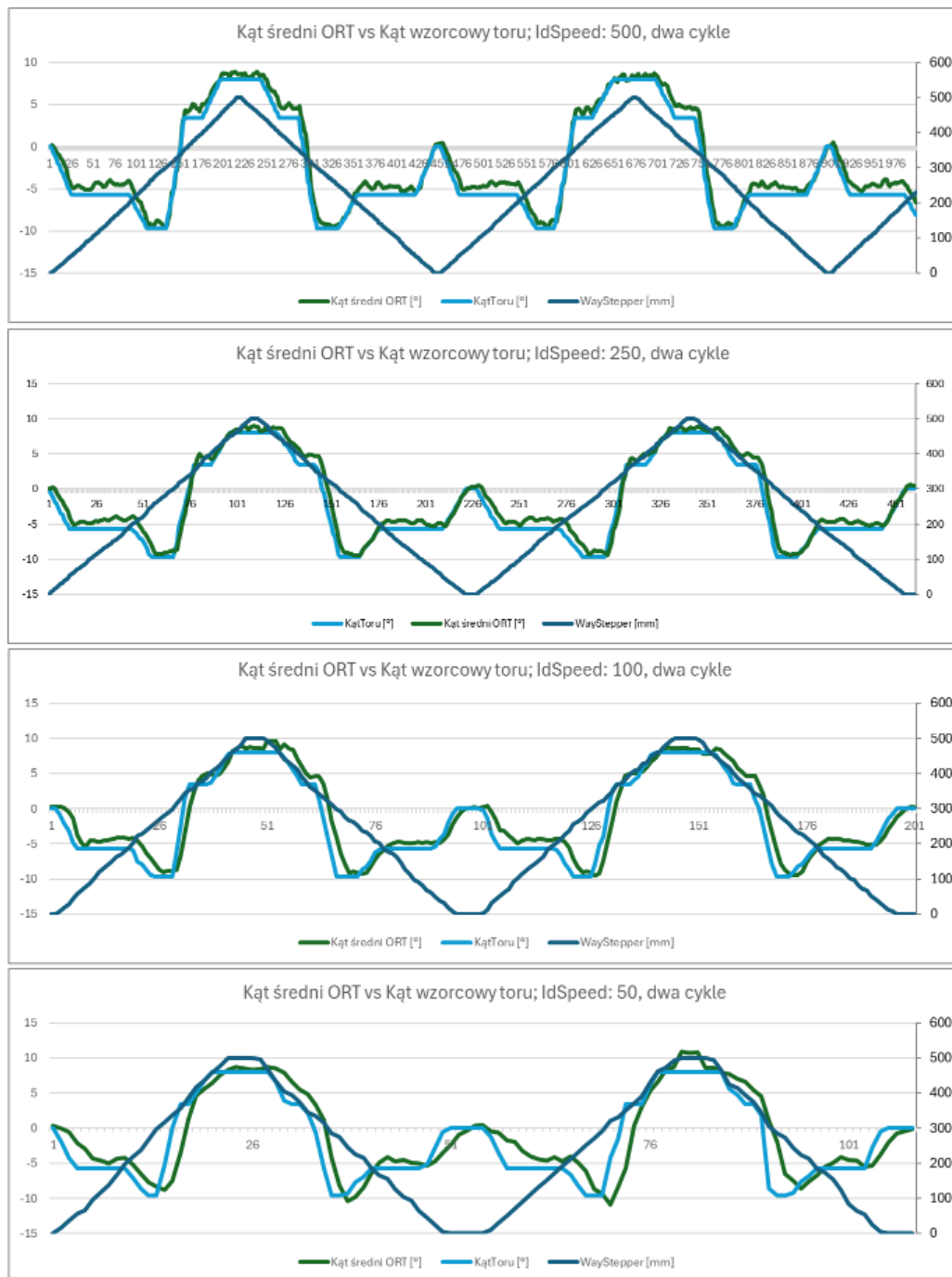
Nr	Okres kroku silnika krokowego [μ s]	Prędkość liniowa [mm/s]	Identyfikator prędkości
1.	500	10,00	500
2.	450	11,11	450
3.	400	12,50	400
4.	350	14,29	350
5.	300	16,67	300
6.	250	20,00	250
7.	200	25,00	200
8.	150	33,33	150
9.	100	50,00	100
10.	50	100,00	50

Tabela 42. Prędkości liniowe na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji kręgosłupa

Dane pomiarowe zebrano do arkusza kalkulacyjnego, w którym wyznaczono w oparciu o pomiary i dane wzorcowe prędkość kątową oraz prędkość liniową. Dokonano także uśrednienia średnią kroczącą pomiaru kąta oraz prędkości kątowej, uśrednienie obejmowało trzy próbki. Następnie przeanalizowano dane pomiarowe, jak prezentują się pomiary i pomiary uśrednione na tle pomiarów wzorcowych.



Rys. 59. Wykresy kąta rotacji [°] zmierzonych przez ortometr, kąta toru wzorcowego [°] oraz drogi ramienia [mm] obejmującej dwa cykle ruchu, dla czterech różnych prędkości (górny wykres dla najniższej prędkości, dolny dla najwyższej).



Rys. 60. Wykresy uśrednionego kąta rotacji [°] zmierzonego przez ortometr, kąta toru wzorcowego [°] oraz drogi ramienia [mm] obejmującej dwa cykle ruchu, dla czterech różnych prędkości (górny wykres dla najniższej prędkości, dolny dla najwyższej).

3.8.2 Wyniki eksperymentów – błędy pomiarowe oraz estymacja modeli

Stanowisko to pozwoliło przede wszystkim na weryfikację działania modeli wyznaczonych na bazie pomiarów z ortometru na stanowisku obrotowym – opisanych w rozdziale 3.7. Estymację przeprowadzono dla wszystkich modeli badanych na stanowisku obrotowym, jednakże w niniejszym rozdziale przedstawiono modele osiągające najlepsze wyniki na tym stanowisku. Są to modele, które uwzględniają prędkość kątową.

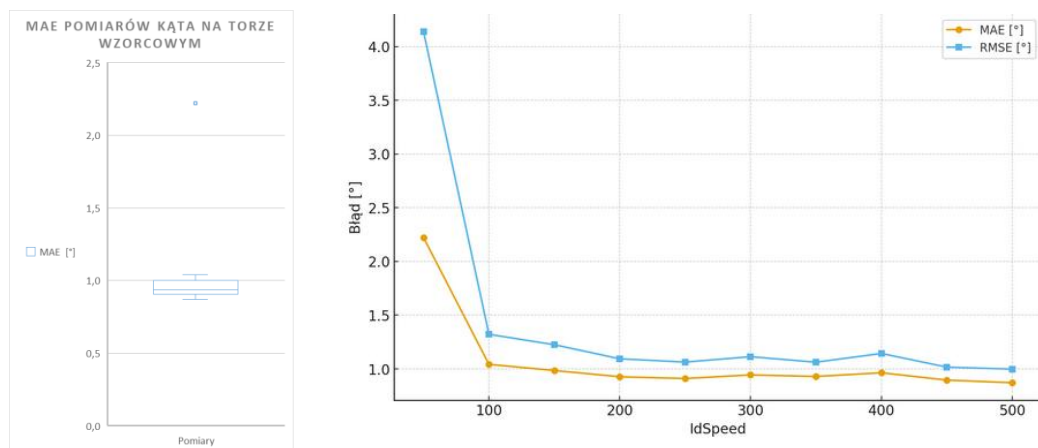
Dodatkowo dane pomiarowe wejściowe do estymacji zostały podzielone na trzy zbiory:

- - zbiór obejmujący pomiary na całości długości toru wzorcowego,
- - zbiór pomiarów dokonanych na tych odcinkach toru, dla których kąt podczas ruchu ortometrem się zmieniał (prędkość kątowa różna od zera),
- - zbiór pomiarów dokonanych na tych odcinkach toru, gdzie kąt podczas ruchu ortometrem był stały (prędkość kątowa wynosiła zero).

W poniższej tabeli przedstawiono ocenę pomiarów kąta ortometru (Pomiary) w zależności od prędkości liniowej zarejestrowanych na całej długości toru wzorcowego bez uwzględniania fazy ruchu:

Metoda pomiaru	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE [°]	RMSE [°]	R2	Id Speed
Pomiary	517	0,10	-0,73	6,39	17,52	-13,67	1,50408	2,22224	17,12065	4,13771	0,52188	50
	986	-0,94	-3,53	6,04	11,97	-11,28	0,81242	1,04230	1,74749	1,32193	0,95102	100
	1420	-1,05	-3,69	5,98	10,34	-10,49	0,81618	0,98529	1,50037	1,22490	0,95731	150
	1831	-1,13	-3,97	5,88	9,47	-10,26	0,83900	0,92663	1,19713	1,09413	0,96536	200
	2298	-1,28	-4,15	5,85	9,67	-10,03	0,85361	0,91073	1,13009	1,06306	0,96709	250
	2724	-1,23	-3,96	5,92	9,91	-10,33	0,89279	0,94385	1,24032	1,11370	0,96429	300
	3153	-1,26	-4,15	5,91	9,43	-10,35	0,90372	0,92940	1,12800	1,06207	0,96744	350
	3573	-1,32	-4,02	5,91	10,38	-9,78	0,88316	0,96400	1,30785	1,14362	0,96211	400
	4019	-1,24	-4,20	5,93	9,37	-9,70	0,87712	0,89592	1,03385	1,01678	0,97029	450
	4449	-1,37	-4,24	5,91	9,23	-10,85	0,84697	0,87119	0,99517	0,99758	0,97129	500

Tabela 43. Statystyki pomiarów kąta z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji dla różnych prędkości kątowych



Rys. 61. Wykresy błędów MAE pomiarów z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji dla różnych prędkości liniowych

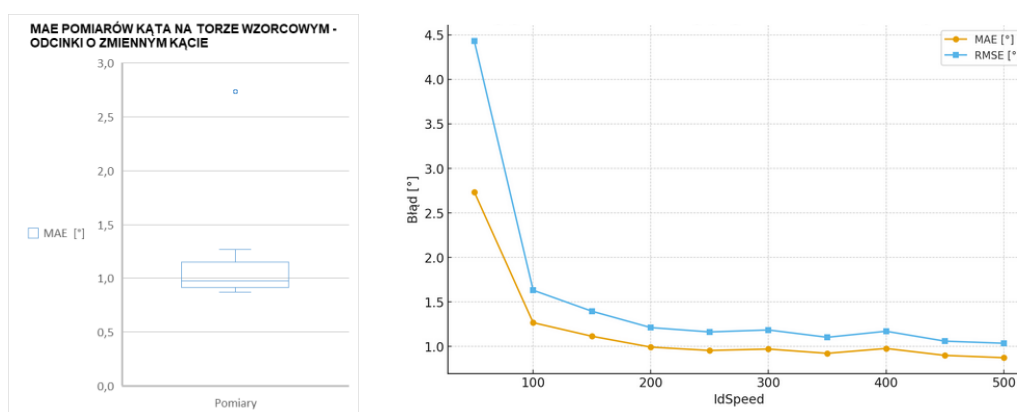
MAE maleje systematycznie wraz ze zmniejszeniem prędkości liniowej (im wyższe IdSpeed odpowiadające interwałowi silnika krokowego tym niższa prędkość liniowa) — z 2.22° do $\sim 0.87^\circ$, co oznacza poprawę dokładności o ok. 60%.

RMSE również spada, co potwierdza redukcję dużych błędów. R^2 rośnie z 0.52 do 0.97, co wskazuje na coraz lepsze dopasowanie modelu do danych wraz ze obniżeniem prędkości liniowej. Przy wysokich prędkościach pomiar jest niestabilny, natomiast przy mniejszych prędkościach pomiary są bardziej spójne i przewidywalne.

W poniższej tabeli przedstawiono ocenę pomiarów kąta ortometru (Pomiary) w zależności od prędkości liniowej zarejestrowanych na odcinkach toru wzorcowego o zmiennym kącie bez uwzględniania fazy ruchu:

Metoda pomiaru	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE [°]	RMSE [°]	R2	Id Speed
Pomiary	1774	-1,14	-2,10	5,49	8,94	-10,85	0,82295	0,87439	1,07415	1,03641	0,96275	500
	1606	-1,01	-1,90	5,49	8,93	-9,70	0,86019	0,90023	1,12395	1,06016	0,96111	450
	1286	-1,04	-2,02	5,52	9,21	-10,35	0,86583	0,92339	1,21773	1,10351	0,95843	350
	922	-1,29	-2,23	5,43	8,88	-10,03	0,82817	0,95589	1,35420	1,16370	0,95288	250
	1121	-1,07	-1,82	5,49	9,00	-10,33	0,86845	0,97156	1,40648	1,18595	0,95150	300
	1455	-1,17	-2,11	5,47	9,45	-9,78	0,86041	0,97826	1,37237	1,17148	0,95220	400
	748	-1,03	-2,05	5,54	9,41	-10,26	0,81122	0,99318	1,47037	1,21259	0,95001	200
	603	-1,23	-1,98	5,59	10,34	-10,49	0,79628	1,11534	1,95004	1,39644	0,93404	150
	428	-1,11	-2,00	5,74	10,09	-11,28	0,80909	1,26797	2,66407	1,63220	0,91283	100
	243	-0,57	-1,35	6,22	14,90	-13,67	1,49966	2,73537	19,63094	4,43068	0,37393	50

Tabela 44. Statystyki pomiarów kąta z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji dla różnych prędkości liniowych – na odcinkach toru wzorcowego o zmiennym kącie



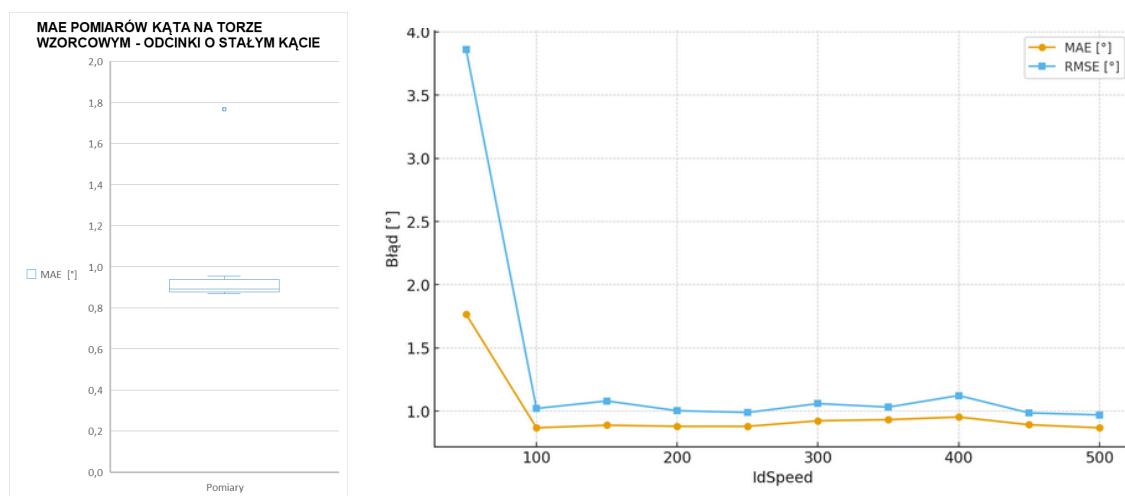
Rys. 62. Wykresy błędów MAE pomiarów z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji dla różnych prędkości liniowych – na odcinkach toru wzorcowego o zmiennym kącie

Przy wyższych prędkościach liniowych (IdSpeed 50–150) pomiary mają większe błędy niż w poprzedniej grupie i mniejszy R^2 , co oznacza gorszą stabilność pomiarową. Od IdSpeed 250 w górę błędy na odcinkach o zmiennych kątach są bardzo zbliżone do błędów na całej długości toru.

W poniższej tabeli przedstawiono ocenę pomiarów kąta ortometru (Pomiary) w zależności od prędkości liniowej zarejestrowanych na odcinkach toru wzorcowego o stałym kącie przedstawiono w poniższej tabeli bez uwzględniania fazy ruchu:

Metoda pomiaru	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE [°]	RMSE [°]	R2	Id Speed
Pomiary	274	0,69	0,26	6,50	17,52	-10,88	1,50800	1,76717	14,89438	3,85932	0,61832	50
	558	-0,81	-4,20	6,26	11,97	-10,47	0,81498	0,86920	1,04446	1,02199	0,97360	100
	817	-0,92	-4,08	6,26	10,01	-10,47	0,83087	0,88930	1,16848	1,08096	0,97022	150
	1083	-1,20	-4,34	6,11	9,47	-9,94	0,85818	0,88066	1,00841	1,00420	0,97353	200
	1376	-1,28	-4,37	6,12	9,67	-9,72	0,87066	0,88048	0,97993	0,98991	0,97428	250
	1603	-1,35	-4,34	6,20	9,91	-10,06	0,90982	0,92447	1,12412	1,06025	0,97095	300
	1867	-1,42	-4,38	6,16	9,43	-9,85	0,92982	0,93354	1,06620	1,03257	0,97213	350
	2118	-1,42	-4,33	6,19	10,38	-9,77	0,89880	0,95421	1,26353	1,12407	0,96716	400
	2413	-1,39	-4,43	6,20	9,37	-9,61	0,88838	0,89304	0,97389	0,98686	0,97481	450
	2675	-1,52	-4,46	6,18	9,23	-9,74	0,86290	0,86908	0,94279	0,97098	0,97549	500

Tabela 45. Statystyki pomiarów kąta z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji dla różnych prędkości liniowych – na odcinkach toru wzorcowego o stałym kącie



Rys. 63. Wykresy błędów MAE pomiarów z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji dla różnych prędkości liniowych – na odcinkach toru wzorcowego o stałym kącie

Dokonano estymacji i poniżej zaprezentowano wyniki:

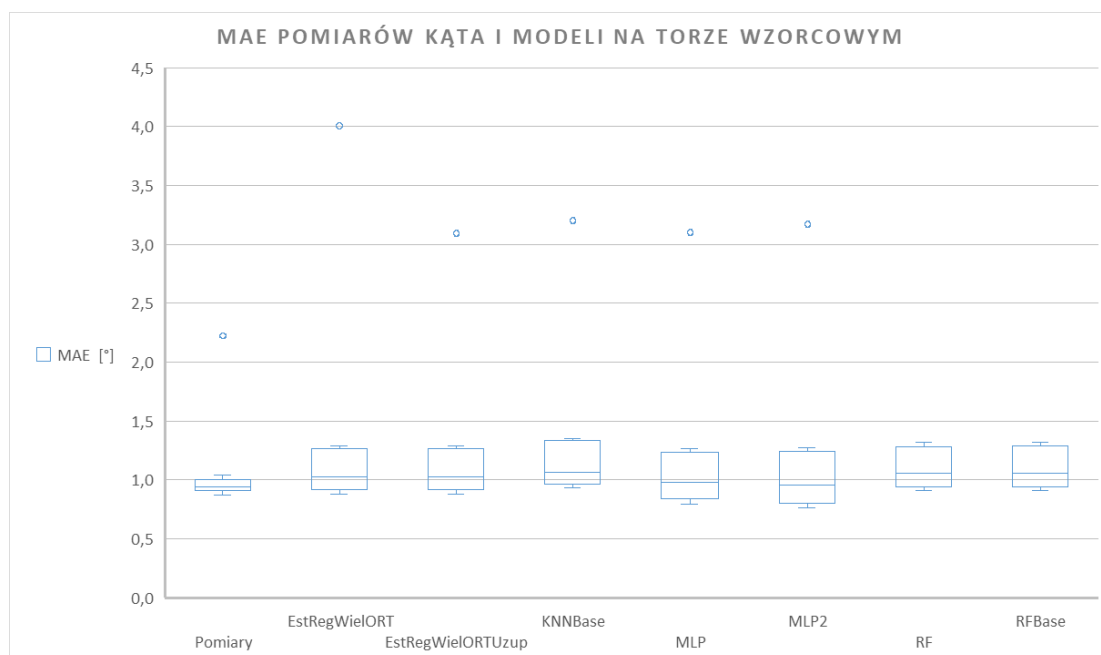
- dla danych pomiarowych nieuśrednionych,
- dla pomiarów kątów nieuśrednionych i prędkości kątowej uśrednionej.

Estymacja dla uśrednionych pomiarów zarówno kąta, jak i prędkości kątowej także została wyznaczona, jednak ze względu na brak znaczących różnic w wynikach została pominięta w dalszych rozważaniach i prezentacji.

Dane pomiarowe nieuśrednione – cały odcinek toru wzorcowego

W pierwszej kolejności dokonano estymacji modeli na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji, na całym odcinku toru wzorcowego dla pomiarów kąta i prędkości kątowej nieuśrednionych.

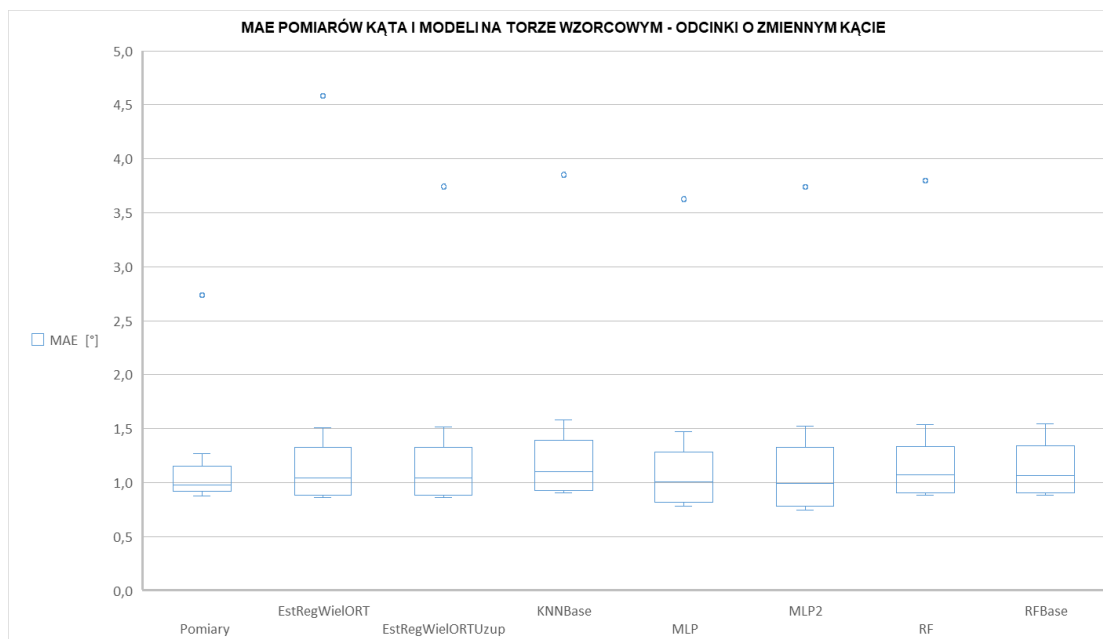
Wyniki, zostały przedstawione w tabeli Tabela 94, która została umieszczona w sekcji z załącznikami. Poniżej przedstawiono wyniki na wykresach porównujących błędy MAE poszczególnych modeli i pomiarów.



Rys. 64. Wykres błędów MAE modeli i pomiarów z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów na całym odcinku toru wzorcowego – pomiary kąta i prędkości kątowej nieuśrednione

Dane pomiarowe nieuśrednione – odcinki toru wzorcowego o zmiennym kącie

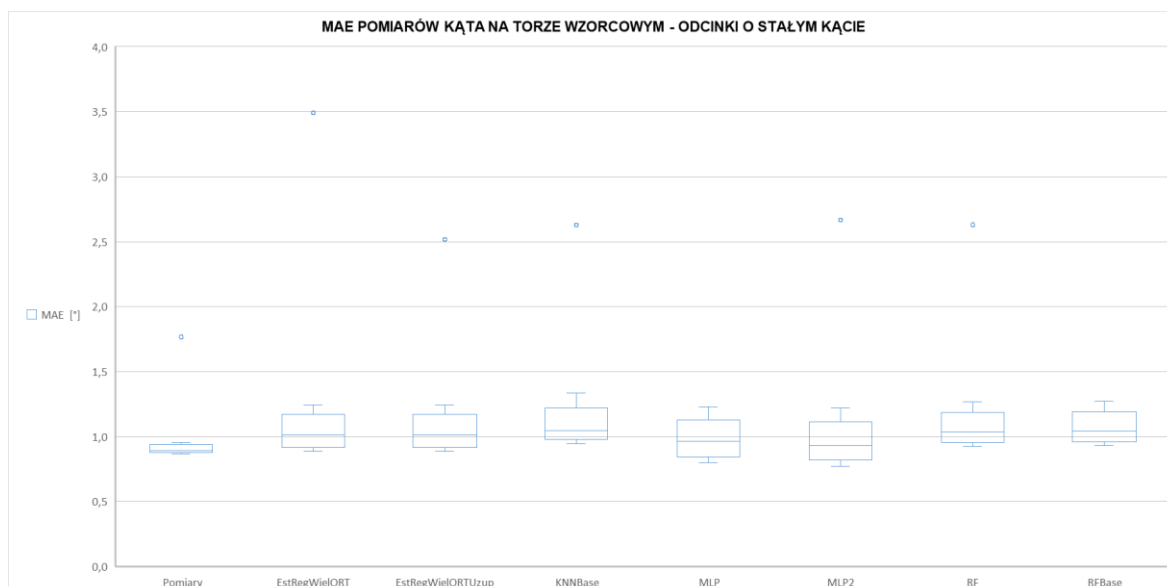
Następnie dokonano estymacji modeli na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji, na odcinkach toru wzorcowego o zmiennym kącie dla pomiarów kąta i prędkości kątowej nieuśrednionych. Wyniki zostały przedstawione w tabeli Tabela 95, która została umieszczona w sekcji z załącznikami. Poniżej przedstawiono wyniki na wykresach porównujących błędy MAE poszczególnych modeli i pomiarów.



Rys. 65. Wykres błędów MAE modeli i pomiarów z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów na odcinkach toru wzorcowego o zmiennym kącie – pomiary kąta i prędkości kątowej nieuśrednione

Dane pomiarowe nieuśrednione – odcinki toru wzorcowego o stałym kącie

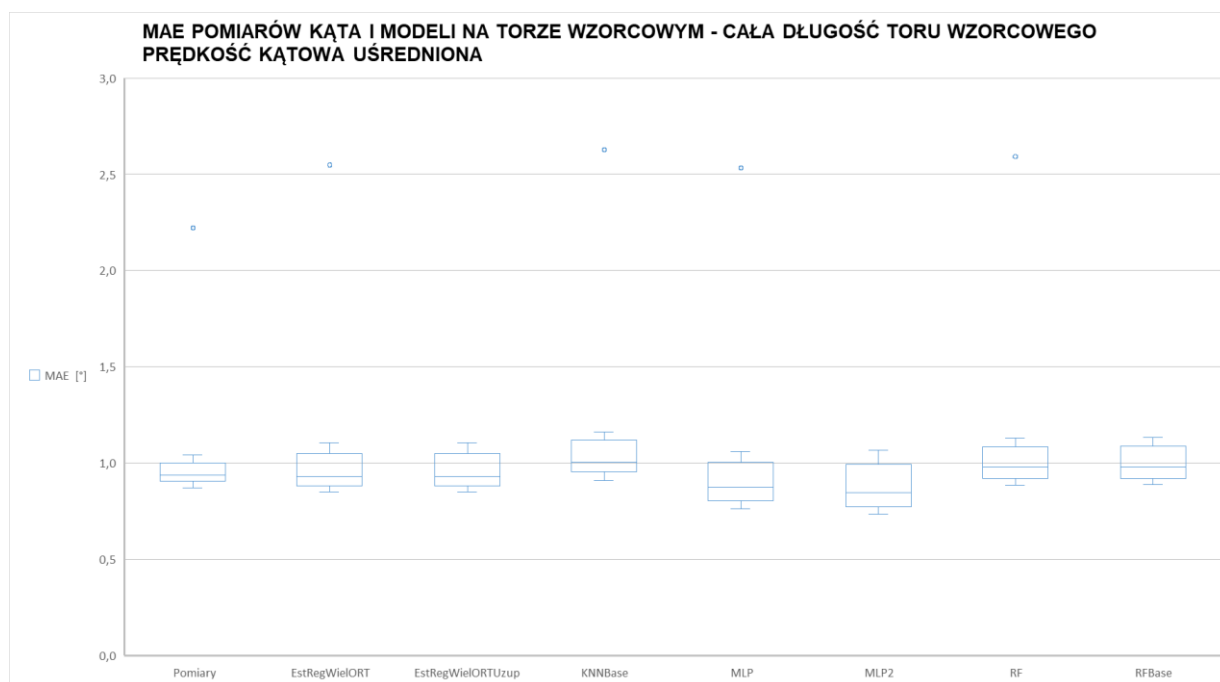
Wyniki estymacji modeli na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji, na odcinkach toru wzorcowego o stałym kącie dla pomiarów kąta i prędkości kątowej nieuśrednionych, zostały przedstawione w tabeli Tabela 96, która została umieszczona w sekcji z załącznikami. Poniżej przedstawiono wyniki na wykresach porównujących błędy MAE poszczególnych modeli i pomiarów.



Rys. 66. Wykres błędów MAE modeli i pomiarów z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów na odcinkach toru wzorcowego o stałym kącie – pomiary kąta i prędkości kątowej nieuśrednione

Pomiary kąta nieuśrednione, prędkość kątowa uśredniona – cały odcinek toru wzorcowego

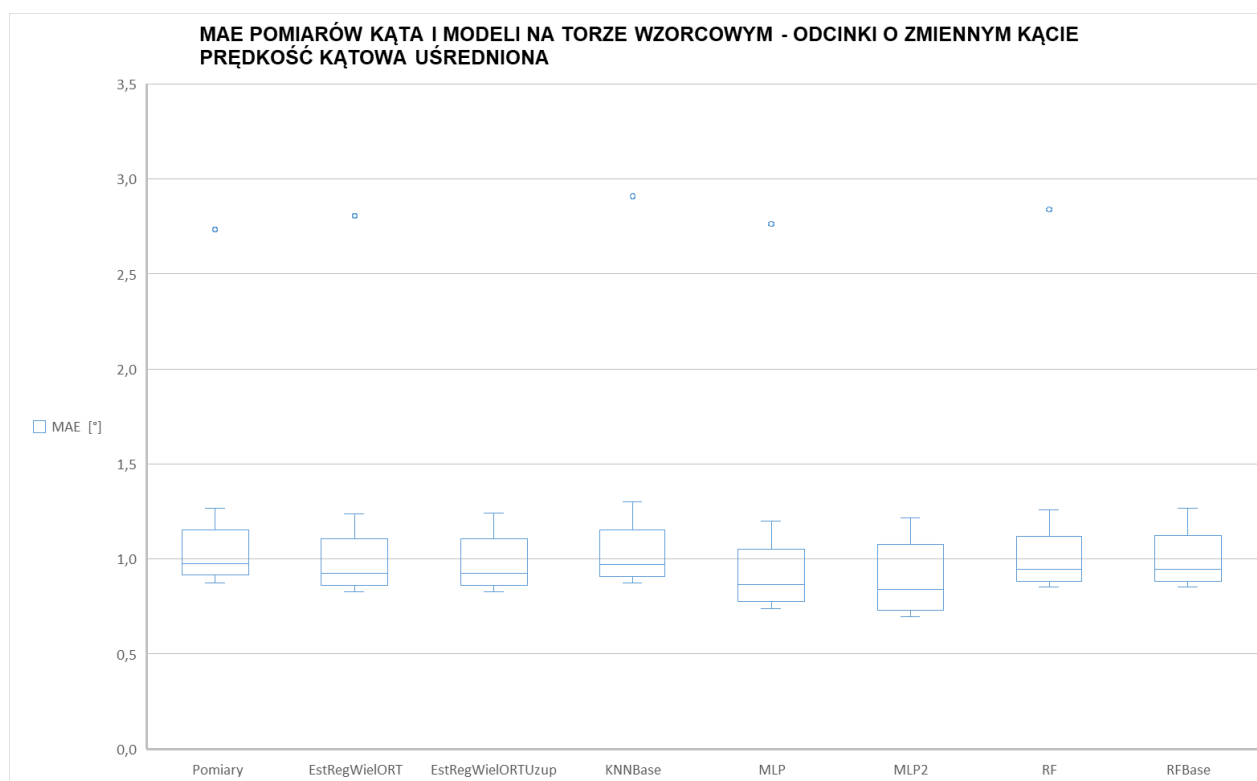
Wyniki estymacji modeli na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji, na całym odcinku toru wzorcowego dla pomiarów kąta nieuśrednionych i uśrednionej prędkości kątowej, zostały przedstawione w tabeli Tabela 97, która została umieszczona w sekcji z załącznikami. Poniżej przedstawiono wyniki na wykresach porównujących błędy MAE poszczególnych modeli i pomiarów.



Rys. 67. Wykres błędów MAE modeli i pomiarów z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów na całym odcinku toru wzorcowego – pomiary kąta nieuśrednione, prędkość kątowa uśredniona

Pomiary kąta nieuśrednione, prędkość kątowa uśredniona – odcinki toru wzorcowego o zmiennym kącie

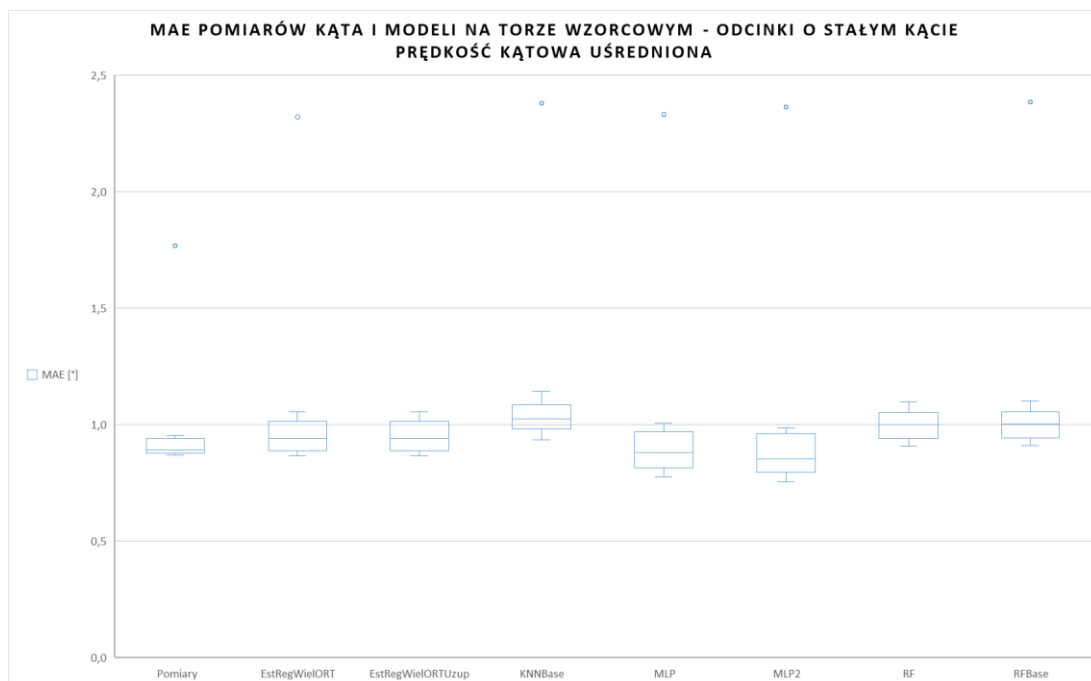
Wyniki estymacji modeli na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji, na odcinkach toru wzorcowego o zmiennym kącie dla pomiarów kąta nieuśrednionych i uśrednionej prędkości kątowej, zostały przedstawione w tabeli Tabela 98, która została umieszczona w sekcji z załącznikami. Poniżej przedstawiono wyniki na wykresach porównujących błędy MAE poszczególnych modeli i pomiarów.



Rys. 68. Wykres błędów MAE modeli i pomiarów z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów na odcinkach toru wzorcowego o zmiennym kącie – pomiary kąta nieuśrednione, prędkość kątowa uśredniona

Pomiary kąta nieuśrednione, prędkość kątowa uśredniona – odcinki toru wzorcowego o zmiennym kącie

Wyniki estymacji modeli na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji, na odcinkach toru wzorcowego o zmiennym kącie dla pomiarów kąta nieuśrednionych i uśrednionej prędkości kątowej, zostały przedstawione w tabeli Tabela 99, która została umieszczona w sekcji z załącznikami. Poniżej przedstawiono wyniki na wykresach porównujących błędy MAE poszczególnych modeli i pomiarów.



Rys. 69. Wykres błędów MAE modeli i pomiarów z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów na odcinkach toru wzorcowego o stałym kącie – pomiary kąta nieuśrednione, prędkość kątowa uśredniona

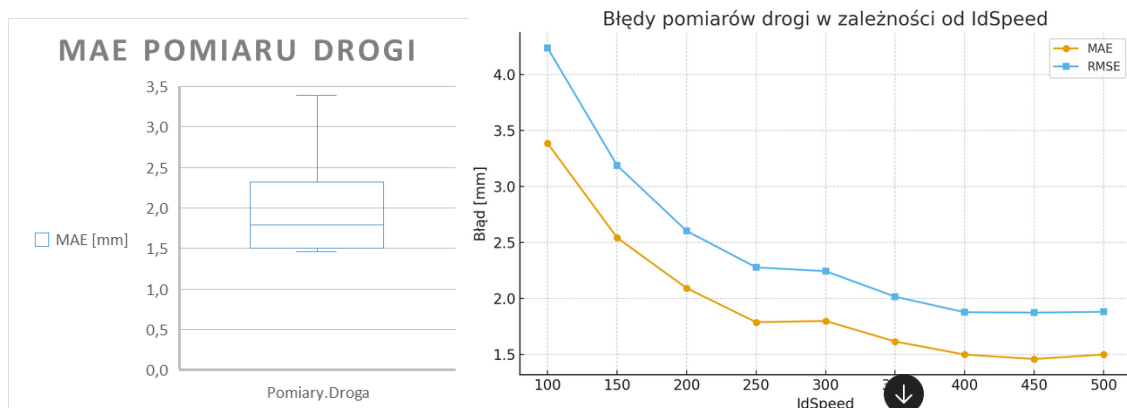
Pełna dyskusja wyników powyższych eksperymentów na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji została umieszczona w podsumowaniu w rozdziale 3.9.3.

3.8.3 Badania pomiarów długości

Badania miały przebieg podobny do badań opisanych w rozdziale 3.8.1. Jediną różnicą był tor, po którym poruszał się ortometr. W tym badaniu ortometr poruszał się po całkowicie płaskim torze, a badanie miało na celu zweryfikowanie zastosowanego w ortometrze toru pomiarowego drogi. Układ pomiaru drogi w ortometrze składa się z enkodera zbudowanego z dwóch czujników Halla i dysku magnetycznego. Zastosowanie dwóch czujników Halla pozwala na detekcję kierunku obrotu. Dysk magnetyczny zawiera 10 par biegunów co pozwala na uzyskanie rozdzielczości 20 impulsów na obrót. Droga wyliczana jest z mnożenia ilości impulsów z obwodem rolki podzielonym przez 20. W poniższej tabeli przedstawiono ocenę pomiarów drogi ortometru (Pomiary.Droga) w zależności od prędkości liniowej zarejestrowanych na całej długości toru wzorcowego bez uwzględniania fazy ruchu:

Metoda pomiaru	Samples	mean_val [mm]	median_val [mm]	std_val [mm]	max_val [mm]	min_val [mm]	ME [mm]	MAE [mm]	MSE [mm]	RMSE [mm]	R2	Id Speed
Pomiary.Droga	304	236,04	236,00	161,38	498,00	0,00	-0,50329	3,38487	17,93750	4,23527	0,99932	100
	1468	233,41	230,00	159,57	498,00	0,00	-0,71185	2,54155	10,15463	3,18663	0,99961	150
	1926	243,19	242,00	157,12	498,00	0,00	-0,70613	2,09138	6,77155	2,60222	0,99973	200
	1850	245,31	244,00	153,15	500,00	0,00	-0,11297	1,78757	5,18541	2,27715	0,99978	250
	2902	241,76	242,00	157,59	500,00	0,00	-0,15231	1,79876	5,03101	2,24299	0,99980	300
	3258	247,96	248,00	154,81	500,00	0,00	-0,00399	1,61541	4,06169	2,01537	0,99983	350
	3963	249,15	248,00	154,51	500,00	0,00	-0,45042	1,49861	3,52183	1,87665	0,99985	400
	3005	239,61	240,00	155,99	498,00	0,00	-0,53378	1,45890	3,51082	1,87372	0,99986	450
	5187	255,86	256,00	159,86	498,00	0,00	-0,97378	1,49933	3,53441	1,88000	0,99986	500

Tabela 46. Statystyki pomiarów drogi z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji dla różnych prędkości liniowych



Rys. 70. Wykresy błędów MAE pomiarów drogi z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji dla różnych prędkości liniowych

MAE pomiaru drogi rośnie wraz ze wzrostem prędkości liniowej – z 1,45mm do 3.38mm. Wysoka wartość R2 (>0.999) świadczy o dużej zgodności pomiarów z modelem odniesienia.

3.8.4 Modele wielomianowe na bazie pomiaru drogi z ortometru oraz prędkości liniowej

Dla zbiorów danych pomiarowych drogi wyznaczono zestaw wielomianów odwrotnych metodą opisaną w rozdziale 3.2.2.1.

WarSrSpeed	Stopień	R2	X	X^2	X^3	X^4	X^5	X^6	X^7	X^8	
Kierunek WZero											
47,50	8	9,9966E-01	-1,5485E-18	2,9231E-15	-2,2772E-12	9,5644E-10	-2,3834E-07	3,6374E-05	-3,3003E-03	1,1625E+00	-1,6101E-01
31,51	8	9,9990E-01	-8,4507E-19	1,8988E-15	-1,7776E-12	8,9174E-10	-2,5636E-07	4,1781E-05	-3,5580E-03	1,1361E+00	5,2715E-01
23,78	8	9,9995E-01	1,6463E-19	-3,4854E-16	3,1451E-13	-1,5886E-10	4,9017E-08	-9,2070E-06	9,5961E-04	9,5988E-01	1,9602E+00
19,25	8	9,9995E-01	-1,1769E-18	2,3350E-15	-1,8893E-12	8,0040E-10	-1,8916E-07	2,4374E-05	-1,5010E-03	1,0320E+00	7,8595E-01
15,59	8	9,9996E-01	1,4643E-20	-2,8341E-17	1,5724E-14	4,2452E-13	-3,2234E-09	1,1397E-06	-1,5897E-04	1,0121E+00	7,3145E-01
13,55	8	9,9997E-01	8,4189E-20	-1,9753E-16	1,8006E-13	-8,2153E-11	1,9909E-08	-2,4613E-06	1,2842E-04	1,0020E+00	5,8190E-01
12,23	8	9,9998E-01	-5,9555E-20	6,1871E-17	3,6886E-16	-2,3788E-11	1,1820E-08	-2,4473E-06	2,3857E-04	9,9232E-01	8,6880E-01
11,59	8	9,9997E-01	-1,0431E-19	2,1952E-16	-1,9004E-13	8,7292E-11	-2,3086E-08	3,6082E-06	-3,2370E-04	1,0181E+00	5,2924E-01
9,79	8	9,9999E-01	-4,5544E-20	8,7209E-17	-6,7126E-14	2,5974E-11	-5,0571E-09	4,0202E-07	2,1466E-06	1,0027E+00	8,2328E-01
Kierunek MZero											
-47,10	8	9,9974E-01	8,2017E-19	-2,0454E-15	2,0875E-12	-1,1226E-09	3,4078E-07	-5,8100E-05	5,2258E-03	7,9006E-01	-1,7289E+00
-30,70	8	9,9993E-01	-4,6078E-19	6,6922E-16	-3,0451E-13	4,7051E-12	3,7544E-08	-1,2182E-05	1,6027E-03	9,1974E-01	-2,3755E+00
-23,82	8	9,9994E-01	3,6379E-19	-8,1206E-16	7,2576E-13	-3,3121E-10	8,1374E-08	-1,0383E-05	6,0720E-04	9,9408E-01	-2,9568E+00
-18,69	8	9,9994E-01	8,8120E-19	-1,8104E-15	1,5181E-12	-6,6641E-10	1,6319E-07	-2,2032E-05	1,5445E-03	9,5295E-01	-2,3792E+00
-16,20	8	9,9995E-01	-1,2468E-20	8,3598E-17	-1,2033E-13	7,3963E-11	-2,1961E-08	2,8428E-06	-3,7463E-05	9,8674E-01	-2,1586E+00
-13,41	8	9,9997E-01	4,2086E-19	-8,3900E-16	7,0784E-13	-3,2950E-10	9,1825E-08	-1,5401E-05	1,4740E-03	9,3476E-01	-1,7184E+00
-12,09	8	9,9998E-01	1,9126E-19	-4,1839E-16	3,8381E-13	-1,8997E-10	5,4314E-08	-8,9395E-06	8,0477E-04	9,7081E-01	-1,8743E+00
-11,50	8	9,9998E-01	6,8089E-19	-1,4274E-15	1,2318E-12	-5,6197E-10	1,4469E-07	-2,0820E-05	1,5668E-03	9,5247E-01	-1,7046E+00
-9,59	8	9,9999E-01	5,4517E-19	-1,1824E-15	1,0555E-12	-4,9938E-10	1,3436E-07	-2,0483E-05	1,6615E-03	9,4397E-01	-8,9016E-01

Tabela 47. Wielomiany odwrotne wyznaczone dla poszczególnych prędkości liniowych na zbiorze pomiarów z ortometru

Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path									
WZero	47,50	5,26	90,91	BDPoPlaskim_cykleOdleglosc_100MatlabWayGroupAll_									
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	136,00	255,57	255,57	0,00	498,00	8,00	0,00	-3,98	4,13	4,13	1,00	1,00	
Estymacja	136,00	259,55	259,55	0,00	501,08	8,95	0,00	0,00	1,99	1,99	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	-1,56	-1,56		-0,62	-11,82		100,00	51,66	51,66	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path									
WZero	31,51	4,03	64,22	BDPoPlaskim_cykleOdleglosc_150MatlabWayGroupAll_									
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	645,00	248,16	248,19	0,61	498,00	2,00	372,00	-3,31	3,34	3,45	1,00	1,00	
Estymacja	645,00	251,46	251,50	0,62	502,20	2,79	374,18	0,00	1,31	1,39	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	-1,33	-1,33	-0,59	-0,84	-39,28	-0,59	100,00	60,68	59,68	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path									
WZero	23,78	2,76	45,45	BDPoPlaskim_cykleOdleglosc_200MatlabWayGroupAll_									
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	865,00	237,53	237,50	0,71	498,00	2,00	468,00	-2,53	2,58	2,71	1,00	1,00	
Estymacja	865,00	240,06	240,03	0,71	502,32	3,88	470,74	0,00	1,05	1,15	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	-1,07	-1,07	-0,58	-0,87	-94,19	-0,59	100,00	59,43	57,64	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path									
WZero	19,25	3,33	37,04	BDPoPlaskim_cykleOdleglosc_250MatlabWayGroupAll_									
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	876,00	250,26	250,26	0,67	498,00	2,00	452,00	-1,89	2,06	2,15	1,00	1,00	
Estymacja	876,00	252,16	252,16	0,67	500,78	2,84	453,86	0,00	1,05	1,16	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	-0,76	-0,76	-0,40	-0,56	-42,21	-0,41	100,00	48,83	46,27	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path									
WZero	15,59	3,19	26,04	BDPoPlaskim_cykleOdleglosc_300MatlabWayGroupAll_									
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	1305,00	248,44	248,44	1,06	500,00	2,00	912,00	-1,81	1,95	2,17	1,00	1,00	
Estymacja	1305,00	250,25	250,25	1,06	502,76	2,75	915,70	0,00	1,15	1,28	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	-0,73	-0,73	-0,41	-0,55	-37,75	-0,41	100,00	41,11	40,74	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path									
WZero	13,55	5,24	28,04	BDPoPlaskim_cykleOdleglosc_350MatlabWayGroupAll_									
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	1506,00	249,71	249,71	0,91	500,00	2,00	816,00	-1,39	1,53	1,72	1,00	1,00	
Estymacja	1506,00	251,10	251,10	0,91	502,11	2,59	818,47	0,00	0,96	1,09	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	-0,56	-0,56	-0,31	-0,42	-29,32	-0,30	100,00	37,02	36,98	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path									
WZero	12,23	3,55	25,21	BDPoPlaskim_cykleOdleglosc_400MatlabWayGroupAll_									
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	1914,00	249,24	249,27	0,90	500,00	0,00	874,00	-1,59	1,66	1,86	1,00	1,00	
Estymacja	1914,00	250,83	250,86	0,90	502,60	0,87	877,20	0,00	0,88	1,02	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	-0,64	-0,64	-0,37	-0,52	-	-0,37	100,00	46,75	45,08	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path									
WZero	11,59	5,29	22,22	BDPoPlaskim_cykleOdleglosc_450MatlabWayGroupAll_									
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	1370,00	249,21	249,28	0,75	498,00	0,00	640,00	-1,80	1,87	2,04	1,00	1,00	
Estymacja	1370,00	251,01	251,08	0,75	500,73	0,53	642,74	0,00	0,95	1,04	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	-0,72	-0,72	-0,42	-0,55	-	-0,43	100,00	49,01	48,75	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path									
WZero	9,79	3,33	18,69	BDPoPlaskim_cykleOdleglosc_500MatlabWayGroupAll_									
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	2399,00	248,64	248,69	0,86	498,00	0,00	920,00	-1,86	1,89	2,09	1,00	1,00	
Estymacja	2399,00	250,50	250,56	0,86	501,14	0,82	924,15	0,00	0,79	0,91	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	-0,75	-0,75	-0,46	-0,63	-	-0,45	100,00	58,22	56,16	0,00	0,00	

Tabela 48. Statystyki pomiarów drogi i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości liniowych większych od zera – pomiary z ortometru.

Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path									
MZero	-47,10	-65,22	-4,26	BDPoPlaskim_cykleOdleglosc_100MatlabWayGroupAll_									
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	131,00	246,74	246,74	0,27	496,00	2,00	44,00	3,09	3,44	3,49	1,00	1,00	
Estymacja	131,00	243,65	243,65	0,27	493,89	-0,13	43,94	0,00	1,93	1,97	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	1,25	1,25	0,14	0,43	106,42	0,14	100,00	43,89	43,37	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path									
MZero	-30,70	-62,50	-4,33	BDPoPlaskim_cykleOdleglosc_150MatlabWayGroupAll_									
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	660,00	248,04	248,02	0,75	496,00	0,00	486,00	1,93	2,17	2,31	1,00	1,00	
Estymacja	660,00	246,11	246,09	0,76	495,68	-2,38	488,02	0,00	1,23	1,32	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	0,78	0,78	-0,43	0,07	-	-0,42	100,00	43,29	42,97	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path									
MZero	-23,82	-45,87	-5,75	BDPoPlaskim_cykleOdleglosc_200MatlabWayGroupAll_									
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	875,00	250,56	250,54	0,65	496,00	0,00	468,00	1,32	1,69	1,81	1,00	1,00	
Estymacja	875,00	249,25	249,23	0,66	496,39	-2,96	471,09	0,00	1,08	1,17	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	0,53	0,53	-0,66	-0,08	-	-0,66	100,00	36,05	35,49	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path									
MZero	-18,69	-36,36	-2,77	BDPoPlaskim_cykleOdleglosc_250MatlabWayGroupAll_									
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	857,00	253,56	253,55	0,61	498,00	0,00	440,00	1,73	1,83	1,99	1,00	1,00	
Estymacja	857,00	251,83	251,82	0,62	497,44	-2,38	441,50	0,00	1,12	1,19	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	0,68	0,68	-0,35	0,11	65535,00	-0,34	100,00	38,96	40,31	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path									
MZero	-16,20	-32,26	-4,26	BDPoPlaskim_cykleOdleglosc_300MatlabWayGroupAll_									
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	1306,00	251,89	251,89	0,97	500,00	0,00	840,00	1,42	1,76	1,94	1,00	1,00	
Estymacja	1306,00	250,47	250,48	0,98	500,16	-2,16	843,80	0,00	1,15	1,29	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	0,56	0,56	-0,46	-0,03	-	-0,45	100,00	34,45	33,46	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path									
MZero	-13,41	-26,79	-2,77	BDPoPlaskim_cykleOdleglosc_350MatlabWayGroupAll_									
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	1507,00	250,77	250,70	0,86	498,00	0,00	774,00	1,46	1,69	1,88	1,00	1,00	
Estymacja	1507,00	249,31	249,23	0,86	498,56	-1,72	778,20	0,00	0,96	1,07	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	0,58	0,58	-0,54	-0,11	-	-0,54	99,99	43,43	43,21	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path									
MZero	-12,09	-27,78	-3,22	BDPoPlaskim_cykleOdleglosc_400MatlabWayGroupAll_									
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	1758,00	249,98	249,98	0,94	500,00	0,00	920,00	0,83	1,31	1,49	1,00	1,00	
Estymacja	1758,00	249,15	249,16	0,95	500,79	-1,87	924,69	0,00	0,92	1,05	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	0,33	0,33	-0,52	-0,16	-	-0,51	100,00	29,72	29,65	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path									
MZero	-11,50	-28,30	-2,87	BDPoPlaskim_cykleOdleglosc_450MatlabWayGroupAll_									
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	1360,00	249,83	249,90	0,81	498,00	0,00	710,00	0,66	1,25	1,42	1,00	1,00	
Estymacja	1360,00	249,17	249,24	0,81	499,32	-1,70	714,40	0,00	0,90	1,01	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	0,27	0,27	-0,63	-0,26	-	-0,62	99,99	28,21	28,43	0,00	0,00	
Tryb	WarSrSpeed	WarMinSpeed	WarMaxSpeed	file_path									
MZero	-9,59	-17,86	-2,89	BDPoPlaskim_cykleOdleglosc_500MatlabWayGroupAll_									
Wzorzec	Samples	mean_val	median_val	std_val	max_val	min_val	range_val	ME	MAE	RMSE	R2	RD2	
Pomiar	2178,00	249,23	249,23	0,80	498,00	0,00	816,00	0,10	1,03	1,23	1,00	1,00	
Estymacja	2178,00	249,12	249,12	0,80	499,51	-0,89	819,57	0,00	0,80	0,92	1,00	1,00	
Poprawa [%]	0,00	0,04	0,04	-0,45	-0,30	-	-0,44	99,94	22,35	25,43	0,00	0,00	

Tabela 49. Statystyki pomiarów drogi i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości liniowych mniejszych od zera – pomiary z ortometru.

Dla danych obejmujących grupy zarejestrowanych pomiarów drogi z ortometru MAE wartości pomiarowych rośnie z prędkością liniową i wynosi: od 1,53mm do 4,13mm (WZero) (Tabela 48) oraz od 1,03mm do 3,44mm (MZero) (Tabela 49). Wyznaczone wielomiany odwrotne dla pomiaru drogi ortometru skutecznie działają dla danej prędkości liniowej. W zależności od prędkości liniowej poprawa wartości MAE estymacji: dla kierunku WZero wynosi od 37,02% do 60,68%, dla kierunku MZero od 22,35% do 43,89%.

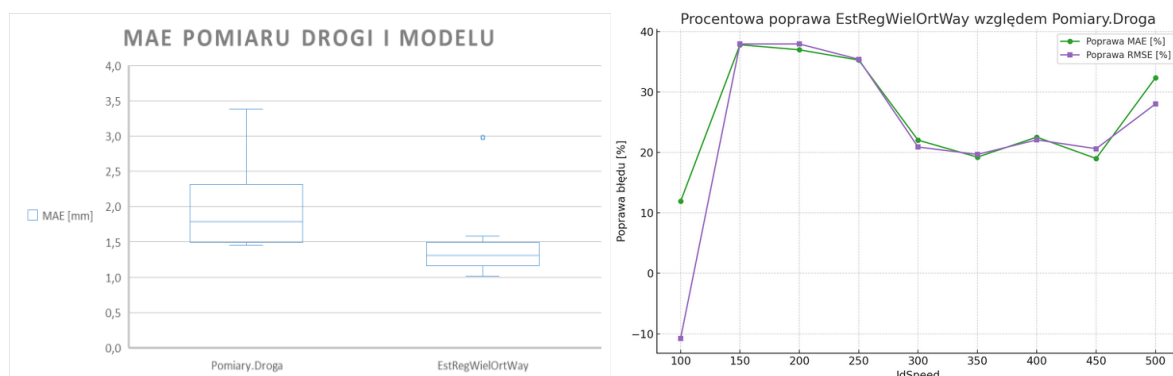
Następnie, wykorzystując metodę wyznaczenia wielomianu odwrotnego (rozdział 3.3.1.3) dla danej prędkości tym razem liniowej stworzono model regresji wielomianowej z uwzględnieniem prędkości liniowej dla danych pomiarowych drogi z ortometru (EstRegWielOrtWay). Efekty działania tego modelu są przedstawione w podsumowaniu wyników estymacji (patrz rozdział 3.8.5).

3.8.5 Wyniki eksperymentów - estymacja pomiarów odległości

Z użyciem modelu EstRegWielOrtWay przeprowadzono estymację regresji wielomianowej z uwzględnieniem prędkości liniowej na stanowisku pomiaru drogi.

Nazwa	Samples	mean_val [mm]	median_val [mm]	std_val [mm]	max_val [mm]	min_val [mm]	ME [mm]	MAE [mm]	MSE	RMSE	R2	Id Speed
Pomiary.Droga	304	236,04	236,00	161,38	498,00	0,00	-0,50329	3,38487	17,93750	4,23527	0,99932	100
	1468	233,41	230,00	159,57	498,00	0,00	-0,71185	2,54155	10,15463	3,18663	0,99961	150
	1926	243,19	242,00	157,12	498,00	0,00	-0,70613	2,09138	6,77155	2,60222	0,99973	200
	1850	245,31	244,00	153,15	500,00	0,00	-0,11297	1,78757	5,18541	2,27715	0,99978	250
	2902	241,76	242,00	157,59	500,00	0,00	-0,15231	1,79876	5,03101	2,24299	0,99980	300
	3258	247,96	248,00	154,81	500,00	0,00	-0,00399	1,61541	4,06169	2,01537	0,99983	350
	3963	249,15	248,00	154,51	500,00	0,00	-0,45042	1,49861	3,52183	1,87665	0,99985	400
	3005	239,61	240,00	155,99	498,00	0,00	-0,53378	1,45890	3,51082	1,87372	0,99986	450
	5187	255,86	256,00	159,86	498,00	0,00	-0,97378	1,49933	3,53441	1,88000	0,99986	500
EstRegWielOrtWay	304	238,45	241,34	162,60	511,00	-1,24	1,90998	2,98168	22,00142	4,69057	0,99916	100
	1468	234,00	228,95	160,29	502,57	-2,51	-0,11843	1,58047	3,91109	1,97765	0,99985	150
	1926	243,81	242,28	157,85	502,57	-2,99	-0,08415	1,31809	2,60776	1,61486	0,99990	200
	1850	245,59	245,11	153,85	503,23	-2,51	0,16747	1,15696	2,16305	1,47073	0,99991	250
	2902	242,23	242,08	158,20	503,09	-2,51	0,32382	1,40247	3,14829	1,77434	0,99987	300
	3258	248,55	247,86	155,53	503,23	-2,51	0,58521	1,30484	2,62102	1,61896	0,99989	350
	3963	249,94	249,77	155,20	503,09	-2,51	0,33055	1,16095	2,13821	1,46226	0,99991	400
	3005	240,47	239,74	156,59	501,09	-2,51	0,32555	1,18175	2,21254	1,48746	0,99991	450
	5187	256,89	257,80	160,54	501,30	-2,51	0,06034	1,01413	1,83138	1,35328	0,99993	500

Tabela 50. Wyniki estymacji modelu dla pomiaru drogi z ortometru



Rys. 71. Wykres błędów MAE pomiarów drogi z ortometru i modelu na stanowisku pomiarowym długości i kątów na całym odcinku toru wzorcowego (wykres z lewej) oraz wykres procentowej poprawy modelu względem pomiarów (wykres z prawej)

3.9 Podsumowanie i wnioski

Stanowiska pomiarowe obrotowe zostały wykorzystane do wyznaczenia funkcji korygujących pomiar kąta rotacji tułowia, przy użyciu zaawansowanych metod numerycznych i różnych metod regresji. Zastosowanie tych metod umożliwiło znaczną redukcję błędów pomiarowych, których wartości zależne były od prędkości obrotowych. Opracowano również metodę kalibracji danych pomiarowych z inklinometru, opartą na aproksymacji wielomianowej. Dzięki niej wyznaczono wielomiany opisujące funkcje przybliżające wartości skalibrowane dla ruchu ortometru w obu kierunkach — w prawo i w lewo — z uwzględnieniem różnych prędkości kątowych. Pokazano metody wyznaczania modeli regresji wielomianowej oraz algorytmów uczenia maszynowego z użyciem sieci neuronowych, z wykorzystaniem lasu losowego i algorytmu K najbliższych sąsiadów. Wyznaczono dwa rodzaje modeli: modele bazujące na pomiarze kąta oraz modele bazujące na pomiarze kąta oraz prędkości kątowej. Każdy model został zweryfikowany poprzez estymację w zadanym zakresie pomiarowym wychylenia i prędkości kątowej. Wyniki estymacji zostały zobrazowane w postaci tabel i wykresów.

Skuteczność modeli wyznaczonych na stanowiskach obrotowych została zweryfikowana na trzecim stanowisku pomiarowym długości i rotacji kąta w ruchu liniowym ortometru po torze wzorcowym. Poniżej przedstawiono podsumowanie wyników najlepszych modeli dla poszczególnych stanowisk i metod.

3.9.1 Stanowisko obrotowe układu akcelerometru

W pierwszym kroku na stanowisku obrotowym układu akcelerometru (patrz rozdz. 3.1) stworzono modele, a następnie dokonano ich estymacji w oparciu o dane surowe zebrane z czujników z wykorzystaniem przewodowego łącza szeregowego.

Model	MAE [°]	RMSE [°]	ω [°/s]	Poprawa MAE	Poprawa RMSE	MAE [°] modelu	Poprawa MAE modelu	RMSE [°] modelu	Poprawa RMSE modelu
EstRegWiel	0,12589	0,15733	1,76	64,85%	63,56%	0,08759	88,45%	0,14224	86,14%
	0,05579	0,08157	3,52	85,42%	82,19%				
	0,08572	0,10679	7,031	78,40%	78,04%				
	0,08132	0,10387	14,06	83,96%	82,16%				
	0,06827	0,09331	28,12	91,18%	89,18%				
	0,06803	0,09940	37,50	92,34%	90,13%				
	0,08378	0,11673	56,25	92,03%	90,76%				
	0,09097	0,17438	112,50	92,87%	90,52%				
MLP.ACC	0,12849	0,34673	225,00	89,23%	84,96%	0,44511	41,30%	1,32095	-28,70%
	1,34525	4,21765	1,76	-275,56%	-876,72%				
	0,85554	3,32657	3,52	-123,64%	-626,30%				
	0,16195	1,13911	7,031	59,20%	-134,20%				
	0,10898	0,19893	14,06	78,51%	65,83%				
	0,08856	0,19447	28,12	88,56%	77,45%				
	0,10497	0,21484	37,50	88,17%	78,66%				
	0,12258	0,23790	56,25	88,33%	81,18%				
EstWiel13	0,51155	0,81484	112,50	59,89%	55,71%	0,51613	31,94%	0,77711	24,29%
	0,70657	1,54428	225,00	40,76%	33,03%				
	0,22301	0,28567	1,76	37,74%	33,85%				
	0,12888	0,20706	3,52	66,31%	54,79%				
	0,11305	0,14673	7,031	71,52%	69,83%				
	0,26140	0,27960	14,06	48,44%	51,97%				
	0,51535	0,56900	28,12	33,41%	34,02%				
	0,62743	0,72788	37,50	29,32%	27,70%				
EstWiel14	0,79872	1,01464	56,25	23,98%	19,73%	0,52130	31,26%	0,75697	26,25%
	1,02349	1,62546	112,50	19,75%	11,65%				
	0,95387	2,13797	225,00	20,02%	7,28%				
	0,26596	0,33320	1,76	25,75%	22,84%				
	0,19320	0,26344	3,52	49,50%	42,48%				
	0,07796	0,13617	7,031	80,36%	72,00%				
	0,22223	0,24076	14,06	56,17%	58,64%				
	0,48070	0,50845	28,12	37,89%	41,04%				
EstWiel12	0,60514	0,67030	37,50	31,83%	33,42%	0,53082	30,00%	0,79059	22,97%
	0,79274	0,96190	56,25	24,55%	23,90%				
	1,04822	1,58494	112,50	17,81%	13,86%				
	1,00554	2,11357	225,00	15,69%	8,34%				
	0,20391	0,25762	1,76	43,07%	40,34%				
	0,15299	0,21031	3,52	60,01%	54,08%				
	0,14212	0,16345	7,031	64,19%	66,40%				
	0,28819	0,30005	14,06	43,16%	48,46%				
Pomiary.ACC	0,54038	0,59506	28,12	30,18%	31,00%	0,75833	0,00%	1,02638	0,00%
	0,64894	0,75307	37,50	26,89%	25,20%				
	0,81558	1,03880	56,25	22,37%	17,82%				
	1,03088	1,64544	112,50	19,17%	10,57%				
	0,95443	2,15154	225,00	19,97%	6,70%				
	0,35820	0,43182	1,76	0,00%	0,00%				
	0,38256	0,45802	3,52	0,00%	0,00%				
	0,39689	0,48639	7,031	0,00%	0,00%				
	0,50701	0,58215	14,06	0,00%	0,00%				
	0,77397	0,86239	28,12	0,00%	0,00%				
	0,88768	1,00680	37,50	0,00%	0,00%				
	1,05063	1,26403	56,25	0,00%	0,00%				
	1,27540	1,83988	112,50	0,00%	0,00%				
	1,19265	2,30595	225,00	0,00%	0,00%				

Tabela 51. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku obrotowym – dla danych surowych akcelerometru

Najdokładniejszym i najstabilniejszym modelem zapewniającym bardzo duże poprawy względem pomiarów w całym zakresie prędkości kątowych jest model EstRegWiel (MAE modelu 0,08759°, poprawa MAE 88,45%, RMSE 0,14224° poprawa RMSE 86,14%). Model ten został stworzony z wykorzystaniem metody regresji na bazie współczynników wielomianów odwrotnych opisanej w rozdziale 3.3.1.3, zależny od wartości kąta wyznaczonego na podstawie wskazań akcelerometru i prędkości kątowej. Model sieci neuronowej MLP.ACC (rozdz. 3.3.2), drugi w zestawieniu pod względem poprawy MAE (41,30%) jest zależny także od wartości kąta i prędkości kątowej. Ma bardzo dobre wyniki dla większych prędkości kątowej (poprawa do

88,56%), jednak dla mniejszych prędkości kątowych zwiększa błąd pomiarów (pogorszenie - 275%) co uniemożliwia jego uniwersalne zastosowanie. Pozostałe w zestawieniu modele to wielomiany odwrotne wyznaczone z wykorzystaniem regresji wielomianowej na bazie pomiaru kąta (rozdz. 3.2.2.1). Osiągają umiarkowany stopień poprawy MAE a najlepsze wskaźniki poprawy błędu wykazują dla prędkości kątowych zbliżonych do tych, dla których zostały wyznaczone. Następnie dokonano uśrednienia danych z akcelerometru, które posłużyły do wyznaczenia i estymacji kolejnych grup modeli. Estymacji poddano także modele powstałe na bazie danych surowych.

Model	MAE [°]	RMSE [°]	ω [°/s]	Poprawa MAE	Poprawa RMSE	MAE [°] modelu	Poprawa MAE modelu	RMSE [°] modelu	Poprawa RMSE modelu
EstRegWielSred	0,10921	0,13237	1,76	69,51%	69,34%	0,05032	93,36%	0,07542	92,65%
	0,04693	0,05937	3,52	87,73%	87,04%				
	0,03810	0,04728	7,031	90,40%	90,28%				
	0,03397	0,04038	14,06	93,30%	93,06%				
	0,02528	0,03323	28,12	96,73%	96,15%				
	0,02657	0,03640	37,50	97,01%	96,38%				
	0,03186	0,04721	56,25	96,97%	96,27%				
	0,05503	0,09964	112,50	95,69%	94,58%				
EstRegWiel	0,08594	0,18289	225,00	92,79%	92,07%	0,07754	89,77%	0,11814	88,49%
	0,12274	0,15582	1,76	65,73%	63,92%				
	0,08783	0,10995	3,52	77,04%	75,99%				
	0,07038	0,09022	7,031	82,27%	81,45%				
	0,04082	0,06962	14,06	91,95%	88,04%				
	0,04993	0,07572	28,12	93,55%	91,22%				
	0,04384	0,07925	37,50	95,06%	92,13%				
	0,05245	0,09293	56,25	95,01%	92,65%				
EstANN15	0,08550	0,13299	112,50	93,30%	92,77%	0,45025	40,63%	0,82155	19,96%
	0,14436	0,25673	225,00	87,90%	88,87%				
	0,36331	1,36053	1,76	-1,43%	-215,07%				
	0,26222	0,33643	3,52	31,46%	26,55%				
	0,18154	0,19372	7,031	54,26%	60,17%				
	0,03239	0,09413	14,06	93,61%	83,83%				
	0,28491	0,33418	28,12	63,19%	61,25%				
	0,41219	0,50910	37,50	53,57%	49,43%				
EstANN14	0,61009	0,82338	56,25	41,93%	34,86%	0,45775	39,64%	0,86713	15,52%
	0,91202	1,51368	112,50	28,49%	17,73%				
	0,99354	2,22878	225,00	16,69%	3,35%				
	0,20231	1,32941	1,76	43,52%	-207,86%				
	0,09750	0,21532	3,52	74,51%	52,99%				
	0,02394	0,04950	7,031	93,97%	89,82%				
	0,15485	0,17832	14,06	69,46%	69,37%				
	0,41294	0,48589	28,12	46,65%	43,66%				
EstWiel15	0,52619	0,65489	37,50	40,72%	34,95%	0,47621	37,20%	0,72067	29,79%
	0,70494	0,95810	56,25	32,90%	24,20%				
	0,97275	1,62340	112,50	23,73%	11,77%				
	1,02429	2,30932	225,00	14,12%	-0,15%				
	0,30920	0,35149	1,76	13,68%	18,60%				
	0,27370	0,29708	3,52	28,46%	35,14%				
	0,18575	0,20396	7,031	53,20%	58,07%				
	0,06509	0,14750	14,06	87,16%	74,66%				
Pomiary.ACC.Średnie	0,31374	0,35631	28,12	59,46%	58,68%	0,79261	-4,52%	1,05576	-2,86%
	0,44772	0,52730	37,50	49,56%	47,63%				
	0,65446	0,83769	56,25	37,71%	33,73%				
	0,96963	1,52539	112,50	23,97%	17,09%				
	1,06657	2,23930	225,00	10,57%	2,89%				
	0,35282	0,42405	1,76	1,50%	1,80%				
	0,37894	0,45272	3,52	0,95%	1,16%				
	0,39515	0,48461	7,031	0,44%	0,37%				
	0,50443	0,58055	14,06	0,51%	0,27%				
	0,77615	0,86193	28,12	-0,28%	0,05%				
	0,89674	1,01075	37,50	-1,02%	-0,39%				
	1,07321	1,27559	56,25	-2,15%	-0,91%				
	1,35157	1,89085	112,50	-5,97%	-2,77%				
	1,40445	2,52083	225,00	-17,76%	-9,32%				

Tabela 52. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku obrotowym – dla uśrednionych danych z akcelerometru

Uśrednienie pomiarów kąta i wyznaczenie z ich wykorzystaniem modelu na bazie współczynników wielomianów odwrotnych EstRegWielSred, opisanego w rozdz. 3.5.2, pozwoliło na obniżenie MAE do $0,05032^\circ$ (poprawa 93,36%). To najlepszy wynik dla danych uśrednionych. Drugim modelem w tym zestawieniu jest model EstRegWiel, wyznaczony na danych surowych. Podanie na jego wejście danych uśrednionych pozwoliło uzyskać także bardzo dobry wynik, lepszy niż dla danych surowych - MAE $0,07754^\circ$ (poprawa 89,77%), RMSE $0,11814^\circ$ (poprawa 88,49%). Następne w kolejności modele neuronowe EstANN15 i EstANN14 mają zbliżony MAE modelu (około $0,45^\circ$), są to modele nie uwzględniające prędkości kątowej. Model EstANN15 najlepszy wynik (MAE $0,02394^\circ$, poprawa 93,97%) osiągnął dla prędkości kątowej, dla której został wyznaczony. To samo obserwujemy także w EstANN14 oraz modelu wielomianu odwrotnego EstWiel15. Pomiary uśrednione mają MAE równy $0,79261^\circ$, gorszy o 4,52% w stosunku do pomiarów surowych – jednak ich zastosowanie pozwoliło uzyskać model o znacznie lepszych wynikach.

W ostatnim etapie badania na tym stanowisku dokonano obliczenia kąta o dane z akcelerometru, jak i żyroskopu (rozdz. 3.6.1). Uzyskane dane posłużyły do stworzenia i estymacji modeli oznaczonych przyrostkiem GYRO. Estymacji poddano także modele powstałe na bazie danych surowych i uśrednionych.

Model	MAE [°]	RMSE [°]	ω [°/s]	Poprawa MAE	Poprawa RMSE	MAE [°] modelu	Poprawa MAE modelu	RMSE [°] modelu	Poprawa RMSE modelu
EstRegWielSred	0,13551	0,17038	1,76	62,17%	60,54%	0,07845	89,65%	0,13008	87,33%
	0,07631	0,09366	3,52	80,05%	79,55%				
	0,06548	0,08338	7,031	83,50%	82,86%				
	0,06760	0,08157	14,06	86,67%	85,99%				
	0,05687	0,07203	28,12	92,65%	91,65%				
	0,06319	0,08243	37,50	92,88%	91,81%				
	0,06621	0,08995	56,25	93,70%	92,88%				
	0,07310	0,15898	112,50	94,27%	91,36%				
EstRegWiel	0,10179	0,33833	225,00	91,47%	85,33%	0,08818	88,37%	0,14345	86,02%
	0,12584	0,15645	1,76	64,87%	63,77%				
	0,06003	0,08556	3,52	84,31%	81,32%				
	0,08686	0,10713	7,031	78,11%	77,98%				
	0,08436	0,10577	14,06	83,36%	81,83%				
	0,06953	0,09460	28,12	91,02%	89,03%				
	0,06825	0,10037	37,50	92,31%	90,03%				
	0,08196	0,11700	56,25	92,20%	90,74%				
MLP.ACC.GYRO	0,09142	0,17592	112,50	92,83%	90,44%	0,32907	56,61%	0,91584	10,77%
	0,12535	0,34827	225,00	89,49%	84,90%				
	1,06462	3,16767	1,76	-197,21%	-633,57%				
	0,66071	2,48704	3,52	-72,71%	-443,00%				
	0,16565	0,85925	7,031	58,26%	-76,66%				
	0,13739	0,18837	14,06	72,90%	67,64%				
	0,13249	0,19022	28,12	82,88%	77,94%				
	0,14470	0,20969	37,50	83,70%	79,17%				
RF.ACC.GYRO	0,16645	0,24616	56,25	84,16%	80,53%	0,38038	49,84%	1,32718	-29,31%
	0,21192	0,33678	112,50	83,38%	81,70%				
	0,27768	0,55740	225,00	76,72%	75,83%				
	1,51789	4,73508	1,76	-323,75%	-996,55%				
	0,94738	3,75706	3,52	-147,65%	-720,29%				
	0,15948	1,28859	7,031	59,82%	-164,93%				
	0,09664	0,27661	14,06	80,94%	52,48%				
	0,08670	0,28469	28,12	88,80%	66,99%				
KNNBase.ACC.GYRO	0,10279	0,31335	37,50	88,42%	68,88%	0,41259	45,59%	1,36675	-33,16%
	0,12154	0,34745	56,25	88,43%	72,51%				
	0,16999	0,41808	112,50	86,67%	77,28%				
	0,22097	0,52366	225,00	81,47%	77,29%				
	1,52421	4,70816	1,76	-325,52%	-990,31%				
	0,95602	3,73970	3,52	-149,90%	-716,50%				
	0,17178	1,28494	7,031	56,72%	-164,18%				
	0,11683	0,29099	14,06	76,96%	50,01%				
Pomiary.ACC.GYRO	0,10760	0,29715	28,12	86,10%	65,54%	0,76590	-1,00%	1,03279	-0,62%
	0,12784	0,32818	37,50	85,60%	67,40%				
	0,16418	0,40760	56,25	84,37%	67,75%				
	0,22880	0,51063	112,50	82,06%	72,25%				
	0,31609	0,73344	225,00	73,50%	68,19%				
	0,36559	0,44016	1,76	-2,06%	-1,93%				
	0,38967	0,46663	3,52	-1,86%	-1,88%				
	0,40371	0,49425	7,031	-1,72%	-1,62%				
	0,51157	0,58931	14,06	-0,90%	-1,23%				
	0,77911	0,86824	28,12	-0,66%	-0,68%				
	0,89438	1,01264	37,50	-0,75%	-0,58%				
	1,05861	1,26909	56,25	-0,76%	-0,40%				
	1,28558	1,84440	112,50	-0,80%	-0,25%				
	1,20485	2,31043	225,00	-1,02%	-0,19%				

Tabela 53. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku obrotowym – dla danych z akcelerometru i żyroskopu

Wyznaczenie kąta o akcelerometr i żyroskop nie wprowadziło istotnej poprawy błędów pomiarowych (MAE 0,76590°) w stosunku do surowych pomiarów wyłącznie z akcelerometru (MAE 0,75833°). Najlepsze okazały się modele na bazie współczynników wielomianów odwrotnych EstRegWielSred oraz EstRegWiel - o zbliżonym, wysokim wskaźniku poprawy MAE ok. 89% - działające skutecznie w całym zakresie prędkości kątowych. Modele wykorzystujące algorytmy uczenia maszynowego KNNBase, RF i MLP osiągnęły stopień poprawy MAE w granicach 46-56%, jednak wykazują się dużą niestabilnością - bardzo dużym pogorszeniem MAE w niskich zakresach prędkości kątowej a wysokim stopniem poprawy w górnych zakresach.

Na stanowisku obrotowym układu akcelerometru najlepszym modelem okazał się model na bazie współczynników wielomianów odwrotnych EstRegWielSred, zbudowany na bazie danych uśrednionych z akcelerometru i poddany estymacji na tego typu danych. Jego MAE to 0,05032° (stopień poprawy 93,36%), RMSE 0,07542° (stopień poprawy 92,65%).

3.9.2 Stanowisko obrotowe ortometru

W etapie badań polegających na obrocie prototypu ortometru na stanowisku pomiarowym opisanym w rozdziale 3.7, dane pomiarowe zostały odebrane łączem bezprzewodowym.

Model	MAE [°]	RMSE [°]	ω [°/s]	Poprawa MAE	Poprawa RMSE	MAE [°] modelu	Poprawa MAE modelu	RMSE [°] modelu	Poprawa RMSE modelu
RFBBase	0,12674	0,30651	1,76	68,67%	37,11%	0,87492	67,55%	1,34211	58,37%
	0,19110	0,38941	3,52	72,67%	49,29%				
	0,27665	0,45291	7,031	78,35%	67,11%				
	0,53202	0,81844	14,06	76,13%	67,03%				
	0,99528	1,51681	28,12	72,33%	64,83%				
	1,68931	2,50938	37,50	63,67%	54,76%				
	2,31337	3,40133	56,25	61,55%	55,21%				
RF	0,13807	0,30251	1,76	65,87%	37,93%	0,92037	65,86%	1,36206	57,76%
	0,20529	0,38925	3,52	70,64%	49,31%				
	0,30713	0,47579	7,031	75,97%	65,45%				
	0,57732	0,84490	14,06	74,10%	65,97%				
	1,05560	1,55187	28,12	70,65%	64,02%				
	1,74200	2,51080	37,50	62,54%	54,74%				
	2,41719	3,45931	56,25	59,82%	54,45%				
KNNBase	0,16044	0,34270	1,76	60,34%	29,69%	0,99666	63,04%	1,46207	54,65%
	0,24912	0,45219	3,52	64,37%	41,11%				
	0,33018	0,51417	7,031	74,16%	62,67%				
	0,60841	0,89473	14,06	72,70%	63,96%				
	1,14538	1,68406	28,12	68,16%	60,95%				
	1,81618	2,60517	37,50	60,94%	53,03%				
	2,66692	3,74149	56,25	55,67%	50,73%				
MLP	0,24160	0,39453	1,76	40,27%	19,06%	1,16496	56,79%	1,52984	52,55%
	0,30451	0,46837	3,52	56,45%	39,01%				
	0,47829	0,65352	7,031	62,57%	52,55%				
	0,89195	1,11397	14,06	59,98%	55,13%				
	1,48296	1,90190	28,12	58,77%	55,90%				
	1,97059	2,51010	37,50	57,62%	54,75%				
	2,78483	3,66653	56,25	53,71%	51,72%				
MLP2	0,28069	0,43606	1,76	30,61%	10,54%	1,20724	55,23%	1,56509	51,46%
	0,31315	0,48718	3,52	55,21%	36,56%				
	0,51482	0,69430	7,031	59,72%	49,59%				
	0,91572	1,14810	14,06	58,91%	53,75%				
	1,54177	1,94869	28,12	57,13%	54,82%				
	2,06189	2,59983	37,50	55,66%	53,13%				
	2,82262	3,64150	56,25	53,09%	52,05%				
EstRegWielORTZmod	0,14916	0,20047	1,76	63,13%	58,87%	1,77548	34,15%	2,53467	21,39%
	0,19830	0,25538	3,52	71,64%	66,74%				
	0,40308	0,49931	7,031	68,46%	63,74%				
	0,76587	0,97562	14,06	65,64%	60,70%				
	1,72226	2,40534	28,12	52,12%	44,23%				
	3,14257	4,69906	37,50	32,42%	15,29%				
	6,04714	8,70755	56,25	-0,51%	-14,66%				
Pomiary.ORT	0,40452	0,48741	1,76	0,00%	0,00%	2,69626	0,00%	3,22420	0,00%
	0,69920	0,76790	3,52	0,00%	0,00%				
	1,27797	1,37720	7,031	0,00%	0,00%				
	2,22871	2,48261	14,06	0,00%	0,00%				
	3,59673	4,31292	28,12	0,00%	0,00%				
	4,65014	5,54694	37,50	0,00%	0,00%				
	6,01658	7,59440	56,25	0,00%	0,00%				

Tabela 54. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku obrotowym ortometru – dla danych nieuśrednionych

Na tak zebranych, surowych danych pomiarowych estymacji poddano zarówno modele utworzone na tym stanowisku, jak i na stanowisku obrotowym układu akcelerometru. Jak można było przypuszczać najlepsze wyniki osiągnęły modele, które były utworzone na stanowisku obrotowym ortometru i tylko takie znalazły się w zestawieniu. Najbardziej stabilne okazały się modele lasu losowego (MAE 0,87°, poprawa błędu 67,55%), zbliżone wyniki osiągnął model KNNBase. Modele MLP mają gorszą stabilność oraz mniejszy stopień poprawy w niższych prędkościach kątowych – wszystkie powyższe modele zostały opisane w 3.7.3. Model na bazie współczynników wielomianów odwrotnych EstRegWielORTZmod (patrz rozdz. 3.7.2) ma bardzo dobre wyniki w niższych prędkościach kątowych, które znacząco pogarszają się wraz ze wzrostem prędkości.

W związku z zauważalnym wzrostem błędów pomiarowych i estymacji modeli w całym zakresie badanych prędkości kątowej poniżej przedstawiono wyniki w ograniczonym do prędkości kątowej 28°/s zbiorze danych pomiarowych.

Model	MAE [°] modelu	Poprawa MAE modelu	RMSE [°] modelu	Poprawa RMSE modelu
RFBBase	0,42436	74,15%	0,69682	63,05%
RF	0,45668	72,18%	0,71286	62,19%
EstRegWielORTZmod	0,64773	60,54%	0,86722	54,01%
EstRegWielORT	0,64786	60,53%	0,86126	54,32%
MLP	0,67986	58,58%	0,90646	51,93%

Tabela 55. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku obrotowym ortometru – prędkość kątowa ograniczona do 28°/s – dla danych nieuśrednionych

Nieuwzględnienie w zestawieniu dwóch najwyższych prędkości kątowych pokazuje, że modele na bazie współczynników wielomianów odwrotnych osiągają poprawę MAE do 60%, jednak nie osiągają skuteczności modeli RF (MAE 0,42436°, poprawa 74,15%). Tak znaczące obniżenie błędów pomiarowych wskazuje na konieczność wprowadzenia zaleceń stosowanych prędkości w warunkach użytkowych w instrukcji użytkownika końcowego urządzenia oraz w oprogramowaniu aplikacyjnym.

Wyniki estymacji modeli na danych uśrednionych przedstawiono poniżej:

Model	MAE [°]	RMSE [°]	ω [°/s]	Poprawa MAE	Poprawa RMSE	MAE [°] modelu	Poprawa MAE modelu	RMSE [°] modelu	Poprawa RMSE modelu
RF	0,12509	0,28276	1,76	69,08%	41,99%	1,07511	60,13%	1,61766	49,83%
	0,17393	0,37563	3,52	75,12%	51,08%				
	0,28588	0,44167	7,031	77,63%	67,93%				
	0,57736	0,84687	14,06	74,09%	65,89%				
	1,41008	2,02304	28,12	60,80%	53,09%				
	2,02279	2,98335	37,50	56,50%	46,22%				
RFBase	2,93061	4,37027	56,25	51,29%	42,45%	1,07672	60,07%	1,62966	49,46%
	0,12224	0,30353	1,76	69,78%	37,73%				
	0,16934	0,38013	3,52	75,78%	50,50%				
	0,28183	0,44749	7,031	77,95%	67,51%				
	0,58184	0,86347	14,06	73,89%	65,22%				
	1,42927	2,05300	28,12	60,26%	52,40%				
MLP	2,05647	3,02407	37,50	55,78%	45,48%	1,20069	55,47%	1,64011	49,13%
	2,89607	4,33593	56,25	51,87%	42,91%				
	0,20997	0,33954	1,76	48,09%	30,34%				
	0,25266	0,37787	3,52	63,86%	50,79%				
	0,37523	0,51311	7,031	70,64%	62,74%				
	0,67038	0,88581	14,06	69,92%	64,32%				
KNNBase	1,46772	1,95100	28,12	59,19%	54,76%	1,24871	53,69%	1,83164	43,19%
	2,13114	2,91443	37,50	54,17%	47,46%				
	3,29771	4,49904	56,25	45,19%	40,76%				
	0,13778	0,32621	1,76	65,94%	33,07%				
	0,22692	0,46581	3,52	67,55%	39,34%				
	0,38038	0,61310	7,031	70,24%	55,48%				
MLP2	0,71989	1,03311	14,06	67,70%	58,39%	1,25412	53,49%	1,67135	48,16%
	1,77860	2,43913	28,12	50,55%	43,45%				
	2,39856	3,34747	37,50	48,42%	39,65%				
	3,09886	4,59663	56,25	48,49%	39,47%				
	0,24671	0,38089	1,76	39,01%	21,85%				
	0,25152	0,38557	3,52	64,03%	49,79%				
EstRegWielORTZmod	0,39765	0,53854	7,031	68,88%	60,90%	1,71103	36,54%	2,43071	24,61%
	0,71851	0,93169	14,06	67,76%	62,47%				
	1,52822	1,99094	28,12	57,51%	53,84%				
	2,23062	2,96436	37,50	52,03%	46,56%				
	3,40558	4,50746	56,25	43,40%	40,65%				
	0,10510	0,14144	1,76	74,02%	70,98%				
Pomiary.ORT	0,15052	0,20240	3,52	78,47%	73,64%	2,69626	0,00%	3,22420	0,00%
	0,32236	0,43570	7,031	74,78%	68,36%				
	0,71132	0,94958	14,06	68,08%	61,75%				
	1,59461	2,17393	28,12	55,66%	49,60%				
	3,21741	4,80079	37,50	30,81%	13,45%				
	5,87591	8,31116	56,25	2,34%	-9,44%				
	0,40452	0,48741	1,76	0,00%	0,00%				
	0,69920	0,76790	3,52	0,00%	0,00%				
	1,27797	1,37720	7,031	0,00%	0,00%				
	2,22871	2,48261	14,06	0,00%	0,00%				
	3,59673	4,31292	28,12	0,00%	0,00%				
	4,65014	5,54694	37,50	0,00%	0,00%				
	6,01658	7,59440	56,25	0,00%	0,00%				

Tabela 56. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku obrotowym ortometru – dla danych uśrednionych

Uśrednienie prędkości kątowej na stanowisku obrotowym ortometru nie wpłynęło na znaczącą poprawę wyników najlepszych modeli – a wręcz ich pogorszenie. Najbardziej stabilne w całym zakresie prędkości kątowych okazały się modele lasu losowego RF (MAE ok. 1.07°, stopień poprawy błędu ok. 60%). Zauważalna jest natomiast poprawa rezultatów modelu współczynników wielomianów odwrotnych, który najlepsze i stabilne wyniki osiągnął w zakresie niższych prędkości kątowych. Bez uwzględnienia dwóch najwyższych prędkości kątowych modele te osiągnęły poprawę błędu ponad 64%, co widać w poniższej tabeli.

Model	MAE [°] modelu	Poprawa MAE modelu	RMSE [°] modelu	Poprawa RMSE modelu
RF	0,51447	68,66%	0,79399	57,89%
RFBBase	0,51690	68,51%	0,80952	57,07%
EstRegWielORTZmod	0,57678	64,86%	0,78061	58,60%
EstRegWielORT	0,58137	64,58%	0,78461	58,39%
MLP	0,59519	63,74%	0,81346	56,86%
MLP2	0,62852	61,71%	0,84553	55,16%

Tabela 57. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku obrotowym ortometru – prędkość kątowa ograniczona do 28°/s – dla danych uśrednionych

Najlepszym modelem na tym stanowisku okazał się model RFBBase na nieuśrednionych danych pomiarowych odebranych z ortometru. Jego MAE to 0,87492° (stopień poprawy 67,55%), RMSE 1,34211° (stopień poprawy 58,37%) w pełnym zakresie prędkości. Po ograniczeniu prędkości kątowej do 28°/s MAE wyniosło 0,42436°, (stopień poprawy 74,15%).

3.9.3 Stanowisko pomiarowe długości i kątów rotacji

Stanowisko, którego konstrukcja została opisana w rozdziale 3.8 posłużyło do oceny modeli wprowadzających poprawkę do pomiaru kąta, wyznaczonych na stanowiskach obrotowych. Ortometr poruszał się automatycznie po torze wzorcowym składającym się z odcinków o stałym zmiennym nachyleniu. W pierwszej kolejności dokonano estymacji na pomiarach nieuśrednionych, obejmujących całą długość toru wzorcowego.

Model	MAE [°]	RMSE [°]	v [mm/s]	Poprawa MAE	Poprawa RMSE	MAE [°] modelu	Poprawa MAE modelu	RMSE [°] modelu	Poprawa RMSE modelu
Pomiary	0,87119	0,99758	10,00	0,00%	0,00%	1,06915	0,00%	1,41755	0,00%
	0,89592	1,01678	11,11	0,00%	0,00%				
	0,96400	1,14362	12,50	0,00%	0,00%				
	0,92940	1,06207	14,29	0,00%	0,00%				
	0,94385	1,11370	16,67	0,00%	0,00%				
	0,91073	1,06306	20,00	0,00%	0,00%				
	0,92663	1,09413	25,00	0,00%	0,00%				
	0,98529	1,22490	33,33	0,00%	0,00%				
	1,04230	1,32193	50,00	0,00%	0,00%				
	2,22224	4,13771	100,00	0,00%	0,00%				
MLP2	0,76321	0,92234	10,00	12,39%	7,54%	1,18471	-10,81%	1,62812	-14,85%
	0,78766	0,93730	11,11	12,08%	7,82%				
	1,05402	1,32015	12,50	-9,34%	-15,44%				
	0,80828	0,97793	14,29	13,03%	7,92%				
	0,98158	1,24393	16,67	-4,00%	-11,69%				
	0,84288	1,01958	20,00	7,45%	4,09%				
	0,93090	1,15551	25,00	-0,46%	-5,61%				
	1,23733	1,58826	33,33	-25,58%	-29,66%				
	1,27037	1,70025	50,00	-21,88%	-28,62%				
	3,17084	5,41594	100,00	-42,69%	-30,89%				
MLP	0,79208	0,95295	10,00	9,08%	4,47%	1,19326	-11,61%	1,63912	-15,63%
	0,81529	0,97080	11,11	9,00%	4,52%				
	1,06435	1,33492	12,50	-10,41%	-16,73%				
	0,84433	1,01142	14,29	9,15%	4,77%				
	1,01503	1,27696	16,67	-7,54%	-14,66%				
	0,86709	1,03990	20,00	4,79%	2,18%				
	0,94795	1,16651	25,00	-2,30%	-6,61%				
	1,22398	1,55937	33,33	-24,23%	-27,31%				
	1,26129	1,67068	50,00	-21,01%	-26,38%				
	3,10126	5,40764	100,00	-39,56%	-30,69%				
EstRegWielORTUzup	0,87679	1,01745	10,00	-0,64%	-1,99%	1,24280	-16,24%	1,65524	-16,77%
	0,89929	1,03081	11,11	-0,38%	-1,38%				
	1,11774	1,37737	12,50	-15,95%	-20,44%				
	0,92224	1,07235	14,29	0,77%	-0,97%				
	1,05056	1,29919	16,67	-11,31%	-16,66%				
	0,92944	1,09135	20,00	-2,05%	-2,66%				
	0,99604	1,20857	25,00	-7,49%	-10,46%				
	1,25307	1,59262	33,33	-27,18%	-30,02%				
	1,28971	1,69718	50,00	-23,74%	-28,39%				
	3,09315	5,16546	100,00	-39,19%	-24,84%				

Model	MAE [°]	RMSE [°]	v [mm/s]	Poprawa MAE	Poprawa RMSE	MAE [°] modelu	Poprawa MAE modelu	RMSE [°] modelu	Poprawa RMSE modelu
RF	0,90964	1,09079	10,00	-4,41%	-9,34%	1,27431	-19,19%	1,73037	-22,07%
	0,92442	1,10067	11,11	-3,18%	-8,25%				
	1,13302	1,40533	12,50	-17,53%	-22,88%				
	0,94340	1,12681	14,29	-1,51%	-6,10%				
	1,08021	1,34186	16,67	-14,45%	-20,49%				
	0,96273	1,15213	20,00	-5,71%	-8,38%				
	1,02524	1,25598	25,00	-10,64%	-14,79%				
	1,26965	1,59748	33,33	-28,86%	-30,42%				
	1,31527	1,75417	50,00	-26,19%	-32,70%				
RFBBase	3,17948	5,47845	100,00	-43,08%	-32,40%	1,27798	-19,53%	1,73527	-22,41%
	0,91046	1,09205	10,00	-4,51%	-9,47%				
	0,92603	1,10266	11,11	-3,36%	-8,45%				
	1,13416	1,40580	12,50	-17,65%	-22,93%				
	0,94471	1,12868	14,29	-1,65%	-6,27%				
	1,08377	1,34536	16,67	-14,82%	-20,80%				
	0,96486	1,15467	20,00	-5,94%	-8,62%				
	1,02601	1,25822	25,00	-10,73%	-15,00%				
	1,27312	1,60026	33,33	-29,21%	-30,64%				
KNNBase	1,32240	1,76927	50,00	-26,87%	-33,84%	1,30168	-21,75%	1,77206	-25,01%
	3,19428	5,49575	100,00	-43,74%	-32,82%				
	0,92964	1,11930	10,00	-6,71%	-12,20%				
	0,95427	1,13841	11,11	-6,51%	-11,96%				
	1,16312	1,44466	12,50	-20,66%	-26,32%				
	0,96386	1,15982	14,29	-3,71%	-9,20%				
	1,08315	1,35665	16,67	-14,76%	-21,81%				
	0,98411	1,18771	20,00	-8,06%	-11,73%				
	1,05085	1,29591	25,00	-13,41%	-18,44%				
EstRegWielORT	1,33165	1,68146	33,33	-35,15%	-37,27%	1,33384	-24,76%	2,80054	-97,56%
	1,35359	1,81905	50,00	-29,87%	-37,61%				
	3,20258	5,51761	100,00	-44,11%	-33,35%				
	0,87681	1,01747	10,00	-0,64%	-1,99%				
	0,89932	1,03084	11,11	-0,38%	-1,38%				
	1,11781	1,37750	12,50	-15,95%	-20,45%				
	0,92226	1,07235	14,29	0,77%	-0,97%				
	1,05060	1,29919	16,67	-11,31%	-16,66%				
	0,92951	1,09140	20,00	-2,06%	-2,67%				
	0,99611	1,20869	25,00	-7,50%	-10,47%				
	1,25282	1,59187	33,33	-27,15%	-29,96%				
	1,28800	1,69397	50,00	-23,57%	-28,14%				
	4,00520	16,62211	100,00	-80,23%	-				

Tabela 58. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji - pomiary nieuśrednione, cała długość toru wzorcowego

Wyniki pierwszych estymacji pokazały, że żaden z ocenianych modeli nie osiągnął błędów mniejszych niż pomiary ortometru, charakteryzujące się błędem MAE 1,06915°. Najlepsze z modeli okazały się modele z grupy MLP, jednak z błędem gorszym o ok. 11% niż pomiary.

Następnie przeprowadzono estymację na danych pomiarowych obejmujących tylko odcinki toru wzorcowego o zmiennym kącie nachylenia, a więc o prędkości kątowej różnej od zera.

Model	MAE [°]	RMSE [°]	v [mm/s]	Poprawa MAE	Poprawa RMSE	MAE [°] modelu	Poprawa MAE modelu	RMSE [°] modelu	Poprawa RMSE modelu
Pomiary	0,87439	1,03641	10,00	0,00%	0,00%	1,17156	0,00%	1,53931	0,00%
	0,90023	1,06016	11,11	0,00%	0,00%				
	0,97826	1,17148	12,50	0,00%	0,00%				
	0,92339	1,10351	14,29	0,00%	0,00%				
	0,97156	1,18595	16,67	0,00%	0,00%				
	0,95589	1,16370	20,00	0,00%	0,00%				
	0,99318	1,21259	25,00	0,00%	0,00%				
	1,11534	1,39644	33,33	0,00%	0,00%				
	1,26797	1,63220	50,00	0,00%	0,00%				
MLP	2,73537	4,43068	100,00	0,00%	0,00%	1,26679	-8,13%	1,68190	-9,26%
	0,78187	0,94497	10,00	10,58%	8,82%				
	0,80641	0,95237	11,11	10,42%	10,17%				
	1,04205	1,27543	12,50	-6,52%	-8,87%				
	0,82112	0,99208	14,29	11,08%	10,10%				
	1,02359	1,27686	16,67	-5,36%	-7,67%				
	0,89178	1,05488	20,00	6,71%	9,35%				
	0,98223	1,19159	25,00	1,10%	1,73%				
	1,21727	1,55758	33,33	-9,14%	-11,54%				
	1,47486	1,94564	50,00	-16,32%	-19,20%				

Model	MAE [°]	RMSE [°]	v [mm/s]	Poprawa MAE	Poprawa RMSE	MAE [°] modelu	Poprawa MAE modelu	RMSE [°] modelu	Poprawa RMSE modelu
	3,62675	5,62759	100,00	-32,59%	-27,01%				
MLP2	0,74766	0,91940	10,00	14,49%	11,29%	1,27126	-8,51%	1,70065	-10,48%
	0,77144	0,92110	11,11	14,31%	13,12%				
	1,03685	1,27257	12,50	-5,99%	-8,63%				
	0,78133	0,96807	14,29	15,38%	12,27%				
	1,01172	1,27596	16,67	-4,13%	-7,59%				
	0,86411	1,05249	20,00	9,60%	9,56%				
	0,97741	1,21196	25,00	1,59%	0,05%				
	1,25963	1,63444	33,33	-12,94%	-17,04%				
	1,52390	2,02727	50,00	-20,18%	-24,20%				
	3,73859	5,72324	100,00	-36,68%	-29,17%				
EstRegWielORTUzup	0,86239	1,01464	10,00	1,37%	2,10%	1,32571	-13,16%	1,75215	-13,83%
	0,87943	1,01623	11,11	2,31%	4,14%				
	1,07865	1,30551	12,50	-10,26%	-11,44%				
	0,88538	1,05043	14,29	4,12%	4,81%				
	1,06607	1,31662	16,67	-9,73%	-11,02%				
	0,94728	1,11295	20,00	0,90%	4,36%				
	1,01693	1,23717	25,00	-2,39%	-2,03%				
	1,26335	1,61771	33,33	-13,27%	-15,85%				
	1,51399	1,97729	50,00	-19,40%	-21,14%				
	3,74368	5,87293	100,00	-36,86%	-32,55%				
RF	0,88489	1,04213	10,00	-1,20%	-0,55%	1,35112	-15,33%	1,77354	-15,22%
	0,90204	1,04141	11,11	-0,20%	1,77%				
	1,09625	1,33418	12,50	-12,06%	-13,89%				
	0,90819	1,06498	14,29	1,65%	3,49%				
	1,10469	1,35293	16,67	-13,70%	-14,08%				
	0,97011	1,12890	20,00	-1,49%	2,99%				
	1,04133	1,25030	25,00	-4,85%	-3,11%				
	1,26997	1,61073	33,33	-13,86%	-15,35%				
	1,53498	2,05885	50,00	-21,06%	-26,14%				
	3,79876	5,85099	100,00	-38,88%	-32,06%				
RFBBase	0,88298	1,04194	10,00	-0,98%	-0,53%	1,35469	-15,63%	1,78116	-15,71%
	0,90163	1,04216	11,11	-0,15%	1,70%				
	1,09498	1,33317	12,50	-11,93%	-13,80%				
	0,90515	1,06352	14,29	1,98%	3,62%				
	1,10678	1,35655	16,67	-13,92%	-14,38%				
	0,96885	1,12885	20,00	-1,36%	3,00%				
	1,04048	1,25159	25,00	-4,76%	-3,22%				
	1,27305	1,61522	33,33	-14,14%	-15,67%				
	1,54743	2,08829	50,00	-22,04%	-27,94%				
	3,82554	5,89033	100,00	-39,85%	-32,94%				
KNNBase	0,90611	1,08194	10,00	-3,63%	-4,39%	1,38262	-18,02%	1,83115	-18,96%
	0,92629	1,08234	11,11	-2,89%	-2,09%				
	1,13174	1,37634	12,50	-15,69%	-17,49%				
	0,92357	1,10115	14,29	-0,02%	0,21%				
	1,11870	1,39051	16,67	-15,14%	-17,25%				
	0,98433	1,17609	20,00	-2,98%	-1,06%				
	1,07651	1,31354	25,00	-8,39%	-8,33%				
	1,32706	1,68675	33,33	-18,98%	-20,79%				
	1,58015	2,15367	50,00	-24,62%	-31,95%				
	3,85175	5,94917	100,00	-40,81%	-34,27%				
EstRegWielORT	0,86241	1,01468	10,00	1,37%	2,10%	1,40938	-20,30%	2,62039	-70,23%
	0,87945	1,01627	11,11	2,31%	4,14%				
	1,07869	1,30557	12,50	-10,27%	-11,45%				
	0,88540	1,05041	14,29	4,11%	4,81%				
	1,06620	1,31668	16,67	-9,74%	-11,02%				
	0,94742	1,11301	20,00	0,89%	4,36%				
	1,01709	1,23736	25,00	-2,41%	-2,04%				
	1,26260	1,61567	33,33	-13,20%	-15,70%				
	1,51078	1,97244	50,00	-19,15%	-20,85%				
	4,58376	14,56179	100,00	-67,57%	-				

Tabela 59. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji - pomiary nieuśrednione, odcinki toru wzorcowego o zmiennym kącie nachylenia

Estymacja na surowych danych pomiarowych pochodzących z odcinków o zmiennym nachyleniu, także nie potwierdziła skuteczności zaproponowanych modeli. Żaden model nie osiągnął mniejszego MAE od pomiarów w pełnym zakresie badanych prędkości liniowych. Najlepszymi modelami również okazały się modele z grupy MLP, jednak ich błąd był większy o ok. 8% od błędu pomiarów. Zmniejszenie zakresu badanych prędkości liniowych (do 25mm/s)

spowodowało, że modele z grupy MLP osiągnęły poprawę względem pomiarów, jak podano w poniższej tabeli.

Model	MAE [°] modelu	Poprawa MAE modelu	RMSE [°] modelu	Poprawa RMSE modelu
MLP2	0,88436	6,16%	1,08879	3,94%
MLP	0,90701	3,76%	1,09831	3,10%
Pomiary	0,94241	0,00%	1,13340	0,00%

Tabela 60. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji - pomiary nieuśrednione, odcinki toru wzorcowego o zmiennym kącie nachylenia, prędkość liniowa do 25mm/s.

W kolejnym kroku badania dokonano estymacji obejmującej pomiary na całej długości toru wzorcowego podając jako argumenty wartości pomiarów kąta surowe oraz prędkości kątowej uśrednione.

Model	MAE [°]	RMSE [°]	v [mm/s]	Poprawa MAE	Poprawa RMSE	MAE [°] modelu	Poprawa MAE modelu	RMSE [°] modelu	Poprawa RMSE modelu
MLP2	0,73264	0,87542	10,00	15,90%	12,25%	1,03068	3,60%	1,41375	0,27%
	0,74850	0,88034	11,11	16,45%	13,42%				
	0,96578	1,19034	12,50	-0,18%	-4,09%				
	0,78015	0,93012	14,29	16,06%	12,42%				
	0,85326	1,04957	16,67	9,60%	5,76%				
	0,79310	0,95604	20,00	12,92%	10,07%				
	0,84198	1,03646	25,00	9,13%	5,27%				
	0,96950	1,23550	33,33	1,60%	-0,87%				
	1,06763	1,40683	50,00	-2,43%	-6,42%				
MLP	2,55427	4,57687	100,00	-14,94%	-10,61%	1,04789	1,99%	1,42756	-0,71%
	0,76063	0,90557	10,00	12,69%	9,22%				
	0,77754	0,91094	11,11	13,21%	10,41%				
	0,98475	1,22199	12,50	-2,15%	-6,85%				
	0,81498	0,96154	14,29	12,31%	9,47%				
	0,88615	1,07674	16,67	6,11%	3,32%				
	0,81751	0,97919	20,00	10,24%	7,89%				
	0,86347	1,05284	25,00	6,82%	3,77%				
	0,97860	1,23318	33,33	0,68%	-0,68%				
Pomiary	1,06094	1,37172	50,00	-1,79%	-3,77%	1,06915	0,00%	1,41755	0,00%
	2,53428	4,56186	100,00	-14,04%	-10,25%				
	0,87119	0,99758	10,00	0,00%	0,00%				
	0,89592	1,01678	11,11	0,00%	0,00%				
	0,96400	1,14362	12,50	0,00%	0,00%				
	0,92940	1,06207	14,29	0,00%	0,00%				
	0,94385	1,11370	16,67	0,00%	0,00%				
	0,91073	1,06306	20,00	0,00%	0,00%				
	0,92663	1,09413	25,00	0,00%	0,00%				
EstRegWielORT	0,98529	1,22490	33,33	0,00%	0,00%	1,10651	-3,49%	1,47510	-4,06%
	1,04230	1,32193	50,00	0,00%	0,00%				
	2,22224	4,13771	100,00	0,00%	0,00%				
	0,85099	0,97708	10,00	2,32%	2,05%				
	0,87414	0,98363	11,11	2,43%	3,26%				
	1,02926	1,24855	12,50	-6,77%	-9,18%				
	0,90278	1,02987	14,29	2,86%	3,03%				
	0,94421	1,12336	16,67	-0,04%	-0,87%				
	0,88163	1,02944	20,00	3,20%	3,16%				
EstRegWielORTUzup	0,91357	1,09601	25,00	1,41%	-0,17%	1,10673	-3,51%	1,47548	-4,09%
	1,01622	1,27642	33,33	-3,14%	-4,21%				
	1,10386	1,41753	50,00	-5,91%	-7,23%				
	2,54850	4,56912	100,00	-14,68%	-10,43%				
	0,85096	0,97706	10,00	2,32%	2,06%				
	0,87411	0,98361	11,11	2,43%	3,26%				
	1,02924	1,24855	12,50	-6,77%	-9,18%				
	0,90275	1,02985	14,29	2,87%	3,03%				
	0,94418	1,12333	16,67	-0,03%	-0,86%				
RF	0,88159	1,02939	20,00	3,20%	3,17%	1,14427	-7,03%	1,54767	-9,18%
	0,91350	1,09590	25,00	1,42%	-0,16%				
	1,01628	1,27669	33,33	-3,14%	-4,23%				
	1,10454	1,41897	50,00	-5,97%	-7,34%				
	2,55017	4,57149	100,00	-14,76%	-10,48%				
	0,88597	1,05997	10,00	-1,70%	-6,25%				
	0,90282	1,06716	11,11	-0,77%	-4,95%				
	1,06892	1,31408	12,50	-10,88%	-14,91%				
	0,92823	1,10468	14,29	0,13%	-4,01%				

Model	MAE [°]	RMSE [°]	v [mm/s]	Poprawa MAE	Poprawa RMSE	MAE [°] modelu	Poprawa MAE modelu	RMSE [°] modelu	Poprawa RMSE modelu
	0,99769	1,21012	16,67	-5,70%	-8,66%				
	0,92494	1,11127	20,00	-1,56%	-4,54%				
	0,95919	1,17148	25,00	-3,51%	-7,07%				
	1,05298	1,32283	33,33	-6,87%	-8,00%				
	1,12818	1,46332	50,00	-8,24%	-10,70%				
	2,59379	4,65175	100,00	-16,72%	-12,42%				
RFBBase	0,88761	1,06152	10,00	-1,88%	-6,41%	1,14707	-7,29%	1,55133	-9,44%
	0,90409	1,06903	11,11	-0,91%	-5,14%				
	1,07060	1,31589	12,50	-11,06%	-15,06%				
	0,93105	1,10792	14,29	-0,18%	-4,32%				
	1,00020	1,21163	16,67	-5,97%	-8,79%				
	0,92665	1,11322	20,00	-1,75%	-4,72%				
	0,95871	1,17092	25,00	-3,46%	-7,02%				
	1,05446	1,32391	33,33	-7,02%	-8,08%				
	1,13318	1,47548	50,00	-8,72%	-11,62%				
KNNBase	2,60418	4,66382	100,00	-17,19%	-12,71%	1,17502	-9,90%	1,58585	-11,87%
	0,91063	1,09571	10,00	-4,53%	-9,84%				
	0,93520	1,11183	11,11	-4,38%	-9,35%				
	1,10739	1,36077	12,50	-14,87%	-18,99%				
	0,96010	1,15255	14,29	-3,30%	-8,52%				
	1,01176	1,23551	16,67	-7,20%	-10,94%				
	0,95976	1,15754	20,00	-5,38%	-8,89%				
	0,99474	1,22458	25,00	-7,35%	-11,92%				
	1,08257	1,36738	33,33	-9,87%	-11,63%				
	1,15993	1,50809	50,00	-11,29%	-14,08%				
	2,62815	4,64454	100,00	-18,27%	-12,25%				

Tabela 61. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji – uśredniona prędkość kątowa, cała długość toru wzorcowego

Uśrednienie prędkości kątowej spowodowało, że modele MLP osiągnęły niewielką poprawę 3% w stosunku do pomiarów w pełnym zakresie prędkości na całej długości toru. Pozostałe modele były gorsze od pomiarów. Zauważono po raz kolejny, że modele wykazywały najgorsze wyniki dla najwyższych prędkości liniowych.

Po ograniczeniu zakresu prędkości liniowej do 25mm/s poprawa MAE osiągnęła ponad 11% dla modelu MLP2 w stosunku do pomiarów.

Model	MAE [°] modelu	Poprawa MAE modelu	RMSE [°] modelu	Poprawa RMSE modelu
MLP2	0,81649	11,28%	0,98833	7,64%
MLP	0,84358	8,33%	1,01554	5,10%
EstRegWielORTUzup	0,91376	0,70%	1,06967	0,04%
EstRegWielORT	0,91380	0,70%	1,06971	0,04%
Pomiary	0,92025	0,00%	1,07013	0,00%
RF	0,95254	-3,51%	1,14839	-7,31%
RFBBase	0,95413	-3,68%	1,15002	-7,46%
KNNBase	0,98280	-6,80%	1,19121	-11,31%

Tabela 62. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji - uśredniona prędkość kątowa, cała długość toru wzorcowego, prędkość liniowa do 25mm/s.

Ostatnim krokiem w badaniu modeli wprowadzającej poprawki do pomiarów kąta było przeprowadzenie ich estymacji na odcinkach toru wzorcowego o zmiennym kącie nachylenia z surowymi pomiarami kąta oraz z prędkością kątową uśrednioną.

Model	MAE [°]	RMSE [°]	v [mm/s]	Poprawa MAE	Poprawa RMSE	MAE [°] modelu	Poprawa MAE modelu	RMSE [°] modelu	Poprawa RMSE modelu
MLP2	0,69817	0,83654	10,00	20,15%	19,28%	1,05588	9,87%	1,43849	6,55%
	0,71415	0,82755	11,11	20,67%	21,94%				
	0,93639	1,13693	12,50	4,28%	2,95%				
	0,73678	0,88490	14,29	20,21%	19,81%				
	0,84329	1,05220	16,67	13,20%	11,28%				
	0,77543	0,93014	20,00	18,88%	20,07%				
	0,83778	1,03973	25,00	15,65%	14,26%				
	1,02948	1,32896	33,33	7,70%	4,83%				
	1,21597	1,59640	50,00	4,10%	2,19%				
MLP	2,77138	4,75152	100,00	-1,32%	-7,24%	1,07544	8,20%	1,44582	6,07%
	0,73893	0,87500	10,00	15,49%	15,57%				
	0,76351	0,87278	11,11	15,19%	17,68%				
	0,95619	1,16064	12,50	2,26%	0,93%				
	0,78378	0,91780	14,29	15,12%	16,83%				
	0,87128	1,06320	16,67	10,32%	10,35%				
	0,80860	0,95049	20,00	15,41%	18,32%				
	0,86380	1,04670	25,00	13,03%	13,68%				
	1,00415	1,27782	33,33	9,97%	8,49%				
EstRegWielORT	1,20081	1,55753	50,00	5,30%	4,57%	1,13653	2,99%	1,50730	2,08%
	2,76331	4,73621	100,00	-1,02%	-6,90%				
	0,82774	0,95710	10,00	5,33%	7,65%				
	0,85388	0,95702	11,11	5,15%	9,73%				
	0,99290	1,19319	12,50	-1,50%	-1,85%				
	0,86418	0,99265	14,29	6,41%	10,05%				
	0,93604	1,12547	16,67	3,66%	5,10%				
	0,87246	1,01519	20,00	8,73%	12,76%				
	0,91309	1,10487	25,00	8,06%	8,88%				
EstRegWielORTUzup	1,06054	1,35166	33,33	4,91%	3,21%	1,13666	2,98%	1,50767	2,06%
	1,23877	1,59718	50,00	2,30%	2,15%				
	2,80569	4,77871	100,00	-2,57%	-7,85%				
	0,82772	0,95709	10,00	5,34%	7,65%				
	0,85386	0,95701	11,11	5,15%	9,73%				
	0,99289	1,19319	12,50	-1,50%	-1,85%				
	0,86415	0,99263	14,29	6,41%	10,05%				
	0,93600	1,12541	16,67	3,66%	5,11%				
	0,87239	1,01510	20,00	8,73%	12,77%				
RF	0,91295	1,10466	25,00	8,08%	8,90%	1,15980	1,00%	1,52531	0,91%
	1,06070	1,35232	33,33	4,90%	3,16%				
	1,24004	1,59934	50,00	2,20%	2,01%				
	2,80591	4,77997	100,00	-2,58%	-7,88%				
	0,85433	0,97706	10,00	2,29%	5,73%				
	0,87044	0,96678	11,11	3,31%	8,81%				
	1,02654	1,22713	12,50	-4,94%	-4,75%				
	0,88602	1,00797	14,29	4,05%	8,66%				
	0,96212	1,15101	16,67	0,97%	2,95%				
RFBase	0,89559	1,02704	20,00	6,31%	11,74%	1,16091	0,91%	1,52799	0,74%
	0,93124	1,11755	25,00	6,24%	7,84%				
	1,07319	1,35147	33,33	3,78%	3,22%				
	1,25942	1,63102	50,00	0,67%	0,07%				
	2,83910	4,79609	100,00	-3,79%	-8,25%				
	0,85208	0,97592	10,00	2,55%	5,84%				
	0,86880	0,96570	11,11	3,49%	8,91%				
	1,02546	1,22716	12,50	-4,83%	-4,75%				
	0,88589	1,00989	14,29	4,06%	8,48%				
Pomiary	0,96159	1,15127	16,67	1,03%	2,92%	1,17156	0,00%	1,53931	0,00%
	0,89365	1,02598	20,00	6,51%	11,83%				
	0,92875	1,11625	25,00	6,49%	7,94%				
	1,07507	1,35400	33,33	3,61%	3,04%				
	1,26682	1,65070	50,00	0,09%	-1,13%				
	2,85098	4,80299	100,00	-4,23%	-8,40%				
	0,87439	1,03641	10,00	0,00%	0,00%				
	0,90023	1,06016	11,11	0,00%	0,00%				
	0,97826	1,17148	12,50	0,00%	0,00%				
KNNBase	0,92339	1,10351	14,29	0,00%	0,00%	1,19149	-1,70%	1,56779	-1,85%
	0,97156	1,18595	16,67	0,00%	0,00%				
	0,95589	1,16370	20,00	0,00%	0,00%				
	0,99318	1,21259	25,00	0,00%	0,00%				
	1,11534	1,39644	33,33	0,00%	0,00%				
	1,26797	1,63220	50,00	0,00%	0,00%				
	2,73537	4,43068	100,00	0,00%	0,00%				
	0,87462	1,01246	10,00	-0,03%	2,31%				
	0,89806	1,01441	11,11	0,24%	4,32%				
	1,05875	1,27392	12,50	-8,23%	-8,74%				
	0,91216	1,05058	14,29	1,22%	4,80%				
	0,97643	1,17380	16,67	-0,50%	1,02%				

Model	MAE [°]	RMSE [°]	v [mm/s]	Poprawa MAE	Poprawa RMSE	MAE [°] modelu	Poprawa MAE modelu	RMSE [°] modelu	Poprawa RMSE modelu
	0,91564	1,05794	20,00	4,21%	9,09%				
	0,96537	1,17481	25,00	2,80%	3,12%				
	1,10324	1,39708	33,33	1,08%	-0,05%				
	1,30118	1,68373	50,00	-2,62%	-3,16%				
	2,90945	4,83917	100,00	-6,36%	-9,22%				

Tabela 63. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji – uśredniona prędkość kątowa, odcinki toru wzorcowego o zmiennym kącie nachylenia

Wyniki estymacji na danych pomiarowych z odcinków toru o zmiennym nachyleniu pokazały, że modele z grupy MLP oraz modele na bazie współczynników wielomianów odwrotnych wykazały poprawę błędu w stosunku do pomiarów odpowiednio około 9% i 3%.

Po wykluczeniu prędkości liniowych powyżej 25mm/s zestawienie najlepszych modeli wygląda następująco:

Model	MAE [°] modelu	Poprawa MAE modelu	RMSE [°] modelu	Poprawa RMSE modelu
MLP2	0,79171	15,99%	0,95828	15,45%
MLP	0,82658	12,29%	0,98380	13,20%
EstRegWielORT	0,89433	5,10%	1,04936	7,42%
EstRegWielORTUzup	0,89428	5,11%	1,04930	7,42%
RF	0,91804	2,59%	1,06779	5,79%
RFBBase	0,91660	2,74%	1,06745	5,82%
Pomiary	0,94241	0,00%	1,13340	0,00%
KNNBase	0,94300	-0,06%	1,10827	2,22%

Tabela 64. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji – uśredniona prędkość kątowa, odcinki toru wzorcowego o zmiennym kącie nachylenia, prędkość liniowa do 25mm/s.

Najlepszym modelem na tym stanowisku pomiarowym okazał się model MLP2 z MAE 1,05588° (poprawa 9,87%) dla prędkości kątowej uśrednionej dla pomiarów na odcinkach toru o zmiennym nachyleniu. Badania potwierdziły konieczność wprowadzenie zaleceń związanych z ograniczeniem zakresu prędkości użytkowych dla ortometru. Ograniczenie prędkości liniowej do 25mm/s zmniejszyło MAE tego modelu do 0,79171°, zwiększając poprawę do 15,99%.

Dodatkowo z wykorzystaniem zaproponowanej metody wielomianu odwrotnego z uwzględnieniem tym razem prędkości liniowej wyznaczono model wnoszący poprawkę do zastosowanej w ortometrze metody pomiaru drogi.

Model	MAE [mm]	RMSE [mm]	v [mm/s]	Poprawa MAE	Poprawa RMSE	MAE [mm] modelu	Poprawa MAE modelu	RMSE [mm] modelu	Poprawa RMSE modelu
Pomiary.Droga	3,38487	4,23527	10,00	0,00%	0,00%	1,96404	0,00%	2,46556	0,00%
	2,54155	3,18663	11,11	0,00%	0,00%				
	2,09138	2,60222	12,50	0,00%	0,00%				
	1,78757	2,27715	14,29	0,00%	0,00%				
	1,79876	2,24299	16,67	0,00%	0,00%				
	1,61541	2,01537	20,00	0,00%	0,00%				
	1,49861	1,87665	25,00	0,00%	0,00%				
	1,45890	1,87372	33,33	0,00%	0,00%				
EstRegWielOrtWay	1,49933	1,88000	50,00	0,00%	0,00%	1,45570	25,88%	1,93890	21,36%
	2,98168	4,69057	100,00	11,91%	-10,75%				
	1,58047	1,97765	10,00	37,81%	37,94%				
	1,31809	1,61486	11,11	36,98%	37,94%				
	1,15696	1,47073	12,50	35,28%	35,41%				
	1,40247	1,77434	14,29	22,03%	20,89%				
	1,30484	1,61896	16,67	19,23%	19,67%				
	1,16095	1,46226	20,00	22,53%	22,08%				
	1,18175	1,48746	25,00	19,00%	20,61%				
	1,01413	1,35328	33,33	32,36%	28,02%				

Tabela 65. Średni stopień poprawy MAE modelu poprawy pomiaru drogi

Wyniki estymacji wykazały, że poprawa MAE modelu EstRegWielOrtWay w stosunku do pomiaru drogi wynosi 25,88% (MAE pomiaru 1,96404mm, MAE modelu 1,4557mm).

Przedstawione wyniki badań pokazują, że **zastosowanie metod regresji pozwala na zwiększenie dokładności pomiarów z ortometru pod względem pomiarów kąta i drogi**, co udowadnia I hipotezę rozprawy.

4 METODY PRZEZNACZONE DO AUTOMATYCZNEGO WYZNACZANIA ASYMETRII GRZBIETU ORAZ KRZYWIZN PRZEDNIO-TYLNICH KRĘGOSŁUPA

W rozdziale zaprezentowano metody wyznaczania parametrów wykorzystywanych w modelu badania postawy ciała opisanego w rozdziale 2.4 i ich zastosowanie w systemie eksperckim z wykorzystaniem klinicznych reguł decyzyjnych. Model bazuje na następujących parametrach:

- ATR (*Angle of Trunk Rotation*) – kąt rotacji tułowia [°],
- HS (*Hump Sum*) – suma maksimum garbu piersiowego i lędźwiowego [°],
- PT (*Pelvic Tilt*) – nachylenie miednicy NM [°],
- LL (*Lumbar Lordosis*) – lordoza lędźwiowa LL [°],
- THK (*Thoracic Kyphosis*) – kifoza piersiowa KP [°].
- test PP (różnica poziomu pięt w leżeniu i siadzie) - $\leq 4\text{mm}$, $\geq 5\text{mm}$,
- StatykaKD – statyka kończyn dolnych: P (prawidłowa), Z (zakłócona),
- skala Beighton’a – skala hipermobilności stawów (0–9),
- wiek pacjenta.

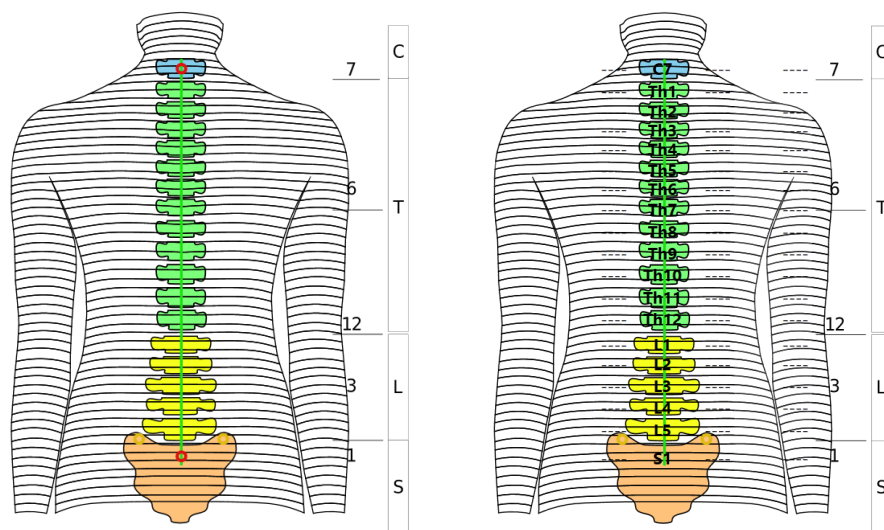
Parametry ATR, HS, PT, LL THK są wyznaczane w oparciu o pomiary z ortometru podczas badania pacjenta zgodnie ze scenariuszami opisanymi w rozdziale 5.4, pozostałe parametry wynikają z danych wprowadzanych do formularzy pacjenta i opisu dodatkowych parametrów badania w aplikacji systemu.

Metodę pomiaru podczas badania postawy ciała ilustruje poniższy rysunek:



Rys. 72. Wizualizacja współpracy badającego z ortometrem i aplikacją komputerową podczas badania .

Schemat ilustrujący poszczególne odcinki kręgosłupa (szyjny C, piersiowy T, lędźwiowy L oraz krzyżowy S) wraz z naniesionymi symbolami poszczególnych kręgów przedstawia się następująco:



Rys. 73. Schemat kręgosłupa człowieka z wyróżnionymi odcinkami oraz symbolami poszczególnych kręgów

Przed rozpoczęciem badania badający zaznacza markerem charakterystyczne punkty pomiarowe na wyrostkach kolczystych kręgów w następujących lokalizacjach:

- C7 (siódmy kręg szyjny),
- Th6 (szósty kręg piersiowy),
- Th12 (dwunasty kręg piersiowy),
- L3 (trzeci kręg lędźwiowy),
- S1 (pierwszy krąg krzyżowy, na poziomie tylnych górnych kolców biodrowych).

4.1 Metoda wyznaczania kąta rotacji tułowia ATR

Metoda wyznaczenia kąta rotacji tułowia ATR (Atrial Trunk Rotation) polega na określeniu maksymalnej wartości bezwzględnej wychylenia ortometru podczas pomiarów w teście Adamsa na odcinku kręgosłupa C7-S1 – zgodnie ze scenariuszem postępowania opisanym w rozdziale 5.4.1.

Niech $\theta(s)$ oznacza kąt wychylenia (w stopniach) w punkcie s wzdłuż kręgosłupa (od C7 do S1). Definicja kąta ATR przedstawia się następująco:

$$ATR = \max_{s \in [C7, S1]} |\theta(s)| \quad (20)$$

Gdzie $\max$ to maximum zbioru - liczba $(\max A) \in A$ jest maksimum zbioru A , gdy:

$$(\forall x \in A) x \leq \max A \text{ oraz } \max A \in A$$

Pomiar ortometrem na zadanym odcinku kręgosłupa wykonywany jest w skończonym zbiorze punktów $s_1, \dots, s_N$, dla którego otrzymujemy wartości kątów wychylenia $\theta_i = \theta(s_i)$, w takim przypadku:

$$ATR = \max_{i=1, \dots, N} |\theta_i| \quad (21)$$

Poniżej zaprezentowano fragment kodu funkcji wyznaczającej ATR w aplikacji ORT w oparciu o listę *medTestContinuousResults* zawierającą obiekty klasy *MedTestContinuousResult*, których atrybut *Roll* przechowuje wartość pomiarową kąta wychylenia. Wartości kąta < 0 oznaczają wychylenie w lewą stronę, wartości dodatnie – w prawą stronę. Elementy listy odpowiadają pojedynczej ramce komunikacyjnej (patrz Listing 9) odebranej z ortometru podczas badania.

```
public class MedTestContinuousResult
{
...
    public double Roll { get; set; }           // [°] Kąt wychylenia lewo-prawo
...
    public int MedTestId { get; set; }
    public virtual MedTest MedTest { get; set; }
}

public Double GetATR(List<MedTestContinuousResult> medTestContinuousResults)
{
    aMin = Double.MaxValue;
    aMax = Double.MinValue;

    if (medTestContinuousResults.Count < 1)
    {
        aMin = aMax = 0;
    }
    else
    {
        // określenie maksymalnych i minimalnych wychyleń (w lewo i prawo)
        foreach(MedTestContinuousResult medTestResult in medTestContinuousResults)
        {
            aMin = System.Math.Min( aMin, medTestResult.Roll );
            aMax = System.Math.Max( aMax, medTestResult.Roll );
        }
    }

    return System.Math.Max( System.Math.Abs(aMin), System.Math.Abs(aMax) );
}
```

Listing 11. Funkcja wyznaczająca kąt rotacji tułowia ATR

4.2 Metoda wyznaczania punktów położenia poszczególnych kręgów na osi drogi kręgosłupa

Metoda określająca, którego kręgu dotyczy wartość wychylenia, bazuje na ciągłym pomiarze kąta i przebytej drogi podczas ruchu ortometrem wzdłuż kręgosłupa w teście Adamsa oraz wykonanych przez badającego pomiarach kąta w punktach charakterystycznych.

Niech:

- $\theta(s)$ oznacza kąt wychylenia (w stopniach) w punkcie s na odcinku kręgosłupa (od C7 do S1),
- $c7, t6, t12, l3, s1$ – punkty charakterystyczne odpowiadające środkom kręgów C7, Th6, Th12, L3 oraz S1.
- $D(s)$ oznacza odległość (w mm) od $c7$, przyjmujemy, że $D(c7) = 0$.

W takim razie odległości pomiędzy poszczególnymi punktami charakterystycznymi wynoszą:

$$D_{C7-T6} = D(t6) - D(c7) \quad (22)$$

$$D_{T6-T12} = D(t12) - D(t6) \quad (23)$$

$$D_{T12-L3} = D(l3) - D(t12) \quad (24)$$

$$D_{L3-S1} = D(s1) - D(l3) \quad (25)$$

Na podstawie wyznaczonych odległości przyjmujemy, że długości odcinków poszczególnych kręgów, są średnio równe:

$$L_{C7} = L_{T1} = L_{T2} = L_{T3} = L_{T4} = L_{T5} = L_{T6} = \frac{D_{C7-T6}}{6} \quad (26)$$

$$L_{T7} = L_{T8} = L_{T9} = L_{T10} = L_{T11} = L_{T12} = \frac{D_{T6-T12}}{6} \quad (27)$$

$$L_{L1} = L_{L2} = L_{L3} = \frac{D_{T12-L3}}{3} \quad (28)$$

$$L_{L4} = L_{L5} = L_{S1} = \frac{D_{L3-S1}}{3} \quad (29)$$

W poniższej tabeli określone są przedziały wartości $D(s)$ i odpowiadające im symbole kręgów.

Symbol kręgu	Przedział $D(s)$	
C7	$\left(0, \frac{1}{2}L_{C7}\right]$	od środka C7 do dolnej krawędzi C7
T1	$\left(\frac{1}{2}L_{C7}, \frac{1}{2}L_{C7} + L_{T1}\right]$	od górnej do dolnej krawędzi T1
Tn, n = 2...12	$\left(\frac{1}{2}L_{C7} + \sum_{i=1}^{n-1} L_{Ti}, \frac{1}{2}L_{C7} + \sum_{i=1}^n L_{Ti}\right]$	od górnej do dolnej krawędzi Tn
L1	$\left(\frac{1}{2}L_{C7} + \sum_{i=1}^{12} L_{Ti}, \frac{1}{2}L_{C7} + \sum_{i=1}^{12} L_{Ti} + L_{L1}\right]$	od górnej do dolnej krawędzi L1
Ln, n = 2...5	$\left(\frac{1}{2}L_{C7} + \sum_{i=1}^{12} L_{Ti} + \sum_{i=1}^{n-1} L_{Li}, \frac{1}{2}L_{C7} + \sum_{i=1}^{12} L_{Ti} + \sum_{i=1}^n L_{Li}\right]$	od górnej do dolnej krawędzi Ln

Tabela 66. Przedziały pomiarów drogi na odcinku kręgosłupa C7-S1 i odpowiadające im kręgi

Bazując na powyższej tabeli mając zmierzoną odległość od C7 możemy określić krąg, w którego obszarze został wykonany pomiar.

4.3 Metoda automatycznego wyznaczania położenia punktów charakterystycznych

Dysponując wykonanymi ortometrem przez eksperta klinicznego pomiarami drogi na odcinku kręgosłupa C7-S1 wraz z zaznaczonymi przez niego wzorcowymi punktami charakterystycznymi możliwe jest określenie odległości pomiędzy nimi oraz ich położenia wyznaczonego w procentach całkowitej długości tego odcinka.

Położenie T6, T12 i L3 na osi przedstawiają się następująco:

$$D_{T6} = D(t6) - D(c7) \quad (30)$$

$$D_{T12} = D(t12) - D(c7) \quad (31)$$

$$D_{L3} = D(l3) - D(c7) \quad (32)$$

Natomiast całkowita długość zmierzonego odcinka:

$$D_{C7-S1} = D(s1) - D(c7) \quad (33)$$

Odpowiednio wyznaczamy procentowe położenie punktu charakterystycznego na odcinku kręgosłupa:

$$X_{T6} = \frac{D_{T6}}{D_{C7-S1}} * 100\% \quad (34)$$

$$X_{T12} = \frac{D_{T12}}{D_{C7-S1}} * 100\% \quad (35)$$

$$X_{L3} = \frac{D_{L3}}{D_{C7-S1}} * 100\% \quad (36)$$

Na bazie pomiarów n pacjentów wyznaczamy średnie procentowe położenie każdego wzorcowego punktu charakterystycznego na odcinku kręgosłupa.

$$\bar{X}_{T6} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n X_{T6_i} \quad (37)$$

$$\bar{X}_{T12} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n X_{T12_i} \quad (38)$$

$$\bar{X}_{L3} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n X_{L3_i} \quad (39)$$

Na bazie wyznaczonych średnich wartości procentowych zostaną wyznaczone estymowane położenia punktów charakterystycznych na odcinku kręgosłupa dla każdego pacjenta oraz dzięki zastosowaniu metody 4.2 położenie odcinków poszczególnych kręgów na osi drogi.

Zaproponowana metoda może służyć uproszczeniu badania bez wyznaczania przez personel markerów punktów charakterystycznych.

4.4 Metoda wyznaczenia sumy garbów HS

Metoda wyznaczenia sumy garbów HS (Hump Sum) polega na określeniu maksymalnych wartości bezwzględnych wychyleń w odcinkach kręgosłupa Th1-Th12 (piersiowy) oraz L1-L5 (lędźwiowy), a następnie ich zsumowaniu. Obliczenia wykonuje się podczas pomiarów w teście Adamsa na odcinku C7-S1 – zgodnie ze scenariuszem postępowania opisanym w rozdziale 5.4.1.

Oznaczając zbiory punktów pomiarowych:

- w części piersiowej jako T (odcinek Th1–Th12), bazując na tabeli Tabela 66 to punkty s , dla których odległość $D(s)$ od $c7$ należy do przedziału:

$$\left(\frac{1}{2} L_{C7}, \frac{1}{2} L_{C7} + \sum_{i=1}^{12} L_{Ti} \right] \quad (40)$$

w części lędźwiowej jako L (odcinek L1–L5), bazując na tabeli Tabela 66 to punkty s , dla których odległość $D(s)$ od $c7$ należy do przedziału:

$$\left(\frac{1}{2} L_{C7} + \sum_{i=1}^{12} L_{Ti}, \frac{1}{2} L_{C7} + \sum_{i=1}^{12} L_{Ti} + \sum_{i=1}^5 L_{Li} \right],$$

sumę garbów HS definiujemy jako:

$$HS = \max_{s \in T} |\theta(s)| + \max_{s \in L} |\theta(s)| \quad (41)$$

W wersji dyskretnej dla badań wykonanych ortometrem (gdzie pomiary w punktach w odcinku piersiowym oznaczamy jako $T = \{t_1, \dots, t_m\}$, a w odcinku lędźwiowym $L = \{\ell_1, \dots, \ell_n\}$):

$$HS = \max_{1 \leq i \leq m} |\theta(t_i)| + \max_{1 \leq j \leq n} |\theta(\ell_j)| \quad (42)$$

Jeśli w którymś z odcinków nie wykonano pomiaru, przyjmuje się maksimum równe 0.

Implementacja metody w aplikacji ORT wyznaczająca HS wykorzystuje do podziału zbioru danych pomiarowych na poszczególne odcinki kręgosłupa informacje z ortometru o naciśnięciu przycisku przez badającego w punkcie charakterystycznym. Wartość atrybutu *OrtMeas* poszczególnych elementów listy uporządkowanej *medTestContinuousResults* wskazuje, którego odcinka dotyczy pomiar.

```
public enum ORT100Measurement
{
    ...
    /// <summary>
    /// pomiar kątów w skłonie, test Adamsa
    /// </summary>
    [Description("C7, skłon, test Adamsa")]
    MEAS_AC7,
    [Description("Th6, skłon, test Adamsa")]
    MEAS_AT6,
    [Description("Th12, skłon, test Adamsa")]
    MEAS_AT12,
    [Description("L3, skłon, test Adamsa")]
    MEAS_AL3,
    [Description("S1, skłon, test Adamsa")]
    MEAS_ASIPS,
    ...
}

public class MedTestContinuousResult
{
    ...
    public double Roll { get; set; } // [°] Kąt wychylenia lewo-prawo
    public int Way { get; set; } // [mm] Przebyta droga podczas pomiaru
    public ORT100Measurement OrtMeas { get; set; }
    ...
    public int MedTestId { get; set; }
    public virtual MedTest MedTest { get; set; }
}

public Double GetHumpSum(List<MedTestContinuousResult> medTestContinuousResults)
{
    Double maxTh1Th12 = 0.0;
    Double maxL1L5 = 0.0;

    foreach(MedTestContinuousResult medTestResult in medTestContinuousResults)
    {
        switch( medTestResult.OrtMeas)
        {
            {
                case Model.Enumerations.ORT100Measurement.MEAS_AC7:
                case Model.Enumerations.ORT100Measurement.MEAS_AT6:
                    {
                        maxTh1Th12 = Max(Abs(medTestResult.Roll), maxTh1Th12);
                        break;
                    }
                case Model.Enumerations.ORT100Measurement.MEAS_AT12:
```

```

        case Model1.Enumerations.ORT100Measurement.MEAS_AL3:
        case Model1.Enumerations.ORT100Measurement.MEAS_ASIPS:
        {
            maxL1L5 = Max(Abs(medTestResult.Roll), maxL1L5);
            break;
        }
    }
    return maxTh1Th12 + maxL1L5;
}

```

Listing 12. Funkcja wyznaczająca sumę garbów HS

4.5 Krzywizny przednio-tylne kręgosłupa

Wyznaczenie krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa polega na wykonaniu czterech pomiarów ortometrem w punktach charakterystycznych w płaszczyźnie strzałkowej. Pomiaru nachylenia miednicy, lordozy lędźwiowej, kifozy wstępującej KW oraz zstępującej KZ dokonuje się podczas oceny krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa – zgodnie ze scenariuszem postępowania opisanym w rozdziale 5.4.3. Kifozę piersiową wyznacza suma wartości KW i KZ.

Zakresy norm poszczególnych krzywizn przedstawiono w poniższej tabeli:

	Poniżej normy	W normie	Powyżej normy
Nachylenie miednicy [°]	< 10	[10,30]	> 30
Lordoza [°]	< 20	[20,45]	> 45
Kifoza piersiowa [°]	< 20	[20,45]	> 45

Tabela 67. Zakresy norm krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa..

4.6 Formularz ankiety

Na potrzeby zebrania wartości parametrów niemierzonych ortometrem przygotowano formularz, w którym personel określa:

- różnicę poziomu pięt w leżeniu i siadzie,
- statykę kończyn dolnych,
- ocenę hipermobilności stawów w skali Beightona.

Formularz diagnostyczny:

Wiek: --- Wzrost[cm]: --- Waga[kg]: ---
 Kąt ATR[°]/Hump sum[°]: --- --- KP[°]: --- LL[°]: ---
 Skala Beightona: ☐ I ☐ II ☐ III ☐ IV ☐ V ☐ VI ☐ VII ☐ VIII ☐ IX
 Test PP (różnica poziomu pięt w leżeniu i siadzie) ☐ >= 5mm ☐ <= 4mm
 Ocena statyki kończyn dolnych:
☐ Koślawość kolan ☐ Koślawość stępu ☐ Zaburzenie chodu
 Grupa Ocena parametrów budowy ciała Postępowanie

Rys. 74. Formularz ankiety wprowadzania skali Beightona oraz statyki kończyn dolnych

4.7 Kliniczne reguły decyzyjne kwalifikacji do grupy ryzyka wystąpienia skoliozy idiopatycznej

Kliniczne reguły decyzyjne zdefiniowane przez eksperta w dziedzinie pozwalające na zakwalifikowanie pacjenta do grupy ryzyka wystąpienia skoliozy idiopatycznej w zależności od wartości parametrów wykorzystywanych w modelu badania postawy ciała przedstawiają się następująco:

Grupa ryzyka IS	ATR [°] / HumpSum [°]	Nachylenie miednicy PT [°]	Lordoza LL [°]	Kifoza THK [°]	Statyka kończyn dolnych	Test PP	Skala Beightona
Grupa IV	ATR $\geq 7^\circ$ lub HS $\geq 8^\circ$	BZN	BZN	BZN	BZN	BZN	
Grupa III	ATR 5° - 6° lub HS 6° - 7°	BZN	BZN	BZN	BZN	BZN	
Grupa II	ATR 3° - 4° lub HS 4° - 5°	$<10^\circ$ lub $>30^\circ$	$<20^\circ$ lub $>45^\circ$	$<20^\circ$ lub $>45^\circ$	Zakłócona	Tak	≥ 5 (5-15 lat), ≥ 4 (16-18 lat)
Grupa I	ATR 3° - 4° lub HS 4° - 5°	10° - 30°	20° - 45°	20° - 45°	Prawidłowa	Nie	≤ 4
Postawa prawidłowa	ATR $\leq 2^\circ$ i HS $< 4^\circ$	10° - 30°	20° - 45°	20° - 45°	Prawidłowa	Nie	≤ 4

Tabela 68. Reguły eksperckie kwalifikacji do grupy ryzyka wystąpienia skoliozy idiopatycznej

Tabela definiuje ekspercki system regułowy (rule-based expert system) o strukturze diagramu przepływu. Reguły eksperckie (if-else) określają progi i przedziały. Hierarchiczne podejście polega na tym, że w pierwszej kolejności określone są warunki najwyższego ryzyka wystąpienia skoliozy idiopatycznej (grupa ryzyka IV $\rightarrow$ III $\rightarrow$ II $\rightarrow$ I).

Najwyższy priorytet w testach progowych mają warunki na zmiennej ATR i HS (Grupa III i IV). W grupie ryzyka II oprócz warunku na ATR i HS występują alternatywy wielu warunków (PT, LL, THK, statyka kończyn dolnych, Test PP, Skala Beightona).

Jednocześnie ekspert zdefiniował reguły decyzyjne pozwalające ocenić postawę ciała na bazie krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa:

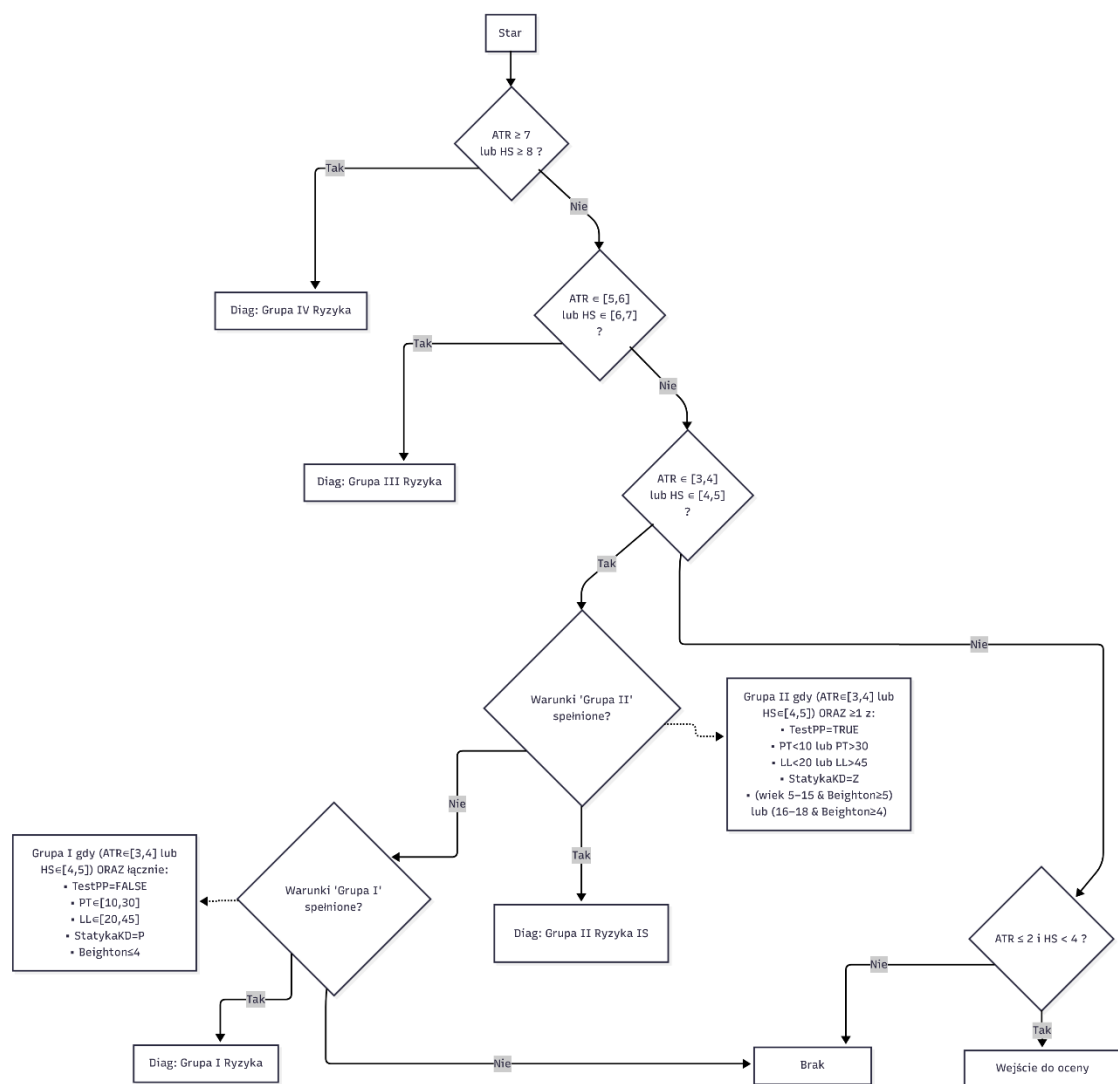
Rodzaj postawy	Nachylenie miednicy PT [°]	Lordoza LL [°]	Kifoza THK [°]
Postawa prawidłowa	10° - 30°	20° - 45°	20° - 45°
Plecy płaskie	10° - 20°	LL $<20^\circ$	THK $<20^\circ$
Postawa kifotyczna	10° - 30°	LL $<20^\circ$	THK $>45^\circ$
Postawa lordotyczna	20° - 40°	LL $>40^\circ$	THK $<20^\circ$
Postawa z przodującą miednicą	10° - 20°	LL $>45^\circ$	20° - 45°

Tabela 69. Parametry oceny postawy ciała na bazie krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa.

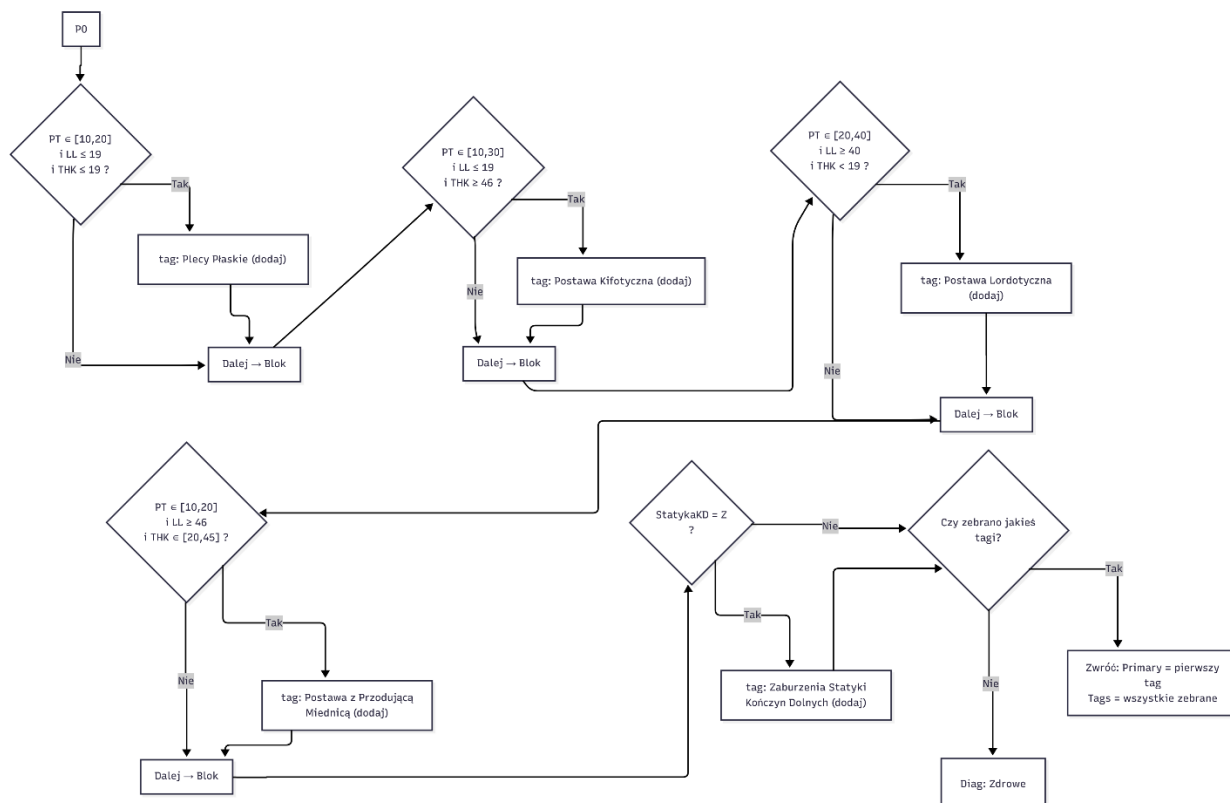
Klasyfikacja rodzaju postaw polega na koniunkcji powyższych warunków.

4.8 Drzewa decyzyjne

Bazując na powyższych regułach zastosowano metodę eksperckich drzew decyzyjnych. Zbudowano hierarchiczne drzewo decyzyjne. Jest to drzewo klasyfikacyjne hybrydowe: główna ścieżka to klasyfikacja jednoklasowa (Grupy ryzyka I-IV / brak), a po niej następuje określenie rodzaju postawy.



Rys. 75. Schemat blokowy drzewa decyzyjnego klasyfikacji do grupy ryzyka wystąpienia skoliozy idiopatycznej.



Rys. 76. Schemat blokowy drzewa decyzyjnego klasyfikacji postawy na bazie krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa

Zaproponowane drzewo decyzyjne jest wielowyjściowe: zwraca jedną etykietę główną związaną z grupą ryzyka wraz z listą etykiet dla rodzaju postawy. Przepływ danych jest niebinarny: część węzłów jest binarna (Tak/Nie), ale „bloki postawy” są sekwencyjne i mogą dodać wiele tagów. Zaletą tego rozwiązania jest pełna kontrola kliniczna, stabilność, przezroczystość, łatwe wdrożenie. Wadą brak automatycznej adaptacji, trzeba ręcznie aktualizować progi; trudniej uchwycić interakcje nieliniowe.

Poniżej przykład implementacji drzewa decyzyjnego

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;

namespace ORT100.CommonItems
{
    public enum Diag
    {
        GrupaIVRyzykaIS,
        GrupaIIIRyzykaIS,
        GrupaIIRyzykaIS,
        GrupaIRyzykaIS,
        PłecyPłaskie,
        PostawaKifotyczna,
        PostawaLordotyczna,
        PostawaZPrzodującąMiednicą,
        ZaburzeniaStatykiKończynDolnych,
        Zdrowe
    }
}
```

```

public enum StatykaKDType { P, Z } // Prawidłowa, zakłócona

public sealed class InputCase
{
    public int WiekLat { get; set; } // do progu Beightona w Grupie II
    public double ATR { get; set; } // [°]
    public double HS { get; set; } // [°]
    public bool TestPP { get; set; } // Tak/Nie
    public double PT { get; set; } // [°]
    public double LL { get; set; } // [°]
    public double THK { get; set; } // [°]
    public StatykaKDType StatykaKD { get; set; } = StatykaKDType.P; // statyka prawidłowa
    public int Beighton { get; set; } // 0-9
}

public static class Diagnoser
{
    static bool InClosed(double x, double lo, double hi) => x >= lo && x <= hi;

    public static (Diag? Primary, List<Diag> Tags) Evaluate(InputCase c)
    {
        var tags = new List<Diag>();

        // Grupy ryzyka IS (hierarchia: IV > III > II > I) ---
        if (c.ATR >= 7 || c.HS >= 8)
            return (Diag.GrupaIVRyzykaIS, tags);

        // Grupa III
        if (InClosed(c.ATR, 5, 6) || InClosed(c.HS, 6, 7))
            return (Diag.GrupaIIIRyzykaIS, tags);

        // Grupa II
        if ((InClosed(c.ATR, 3, 4) || InClosed(c.HS, 4, 5)) &&
            (
                c.TestPP == true ||
                (c.PT < 10 || c.PT > 30) ||
                (c.LL < 20 || c.LL > 45) ||
                (c.StatykaKD == StatykaKDType.Z) ||
                (
                    (c.WiekLat >= 5 && c.WiekLat <= 15 && c.Beighton >= 5) ||
                    (c.WiekLat >= 16 && c.WiekLat <= 18 && c.Beighton >= 4)
                )
            ))
            return (Diag.GrupaIIRyzykaIS, tags);

        // Grupa I
        if ((InClosed(c.ATR, 3, 4) || InClosed(c.HS, 4, 5)) &&
            c.TestPP == false &&
            InClosed(c.PT, 10, 30) &&
            InClosed(c.LL, 20, 45) &&
            (c.StatykaKD == StatykaKDType.P) &&
            c.Beighton <= 4)
            return (Diag.GrupaIRyzykaIS, tags);

        // Postawy / Zdrowe (obowiązkowo ATR ≤2 i HS <4) ---
        if (c.ATR <= 2 && c.HS < 4)
        {
            if (InClosed(c.PT, 10, 20) && c.LL <= 19 && c.THK <= 19)
                tags.Add(Diag.PlecyPlaskie);

            if (InClosed(c.PT, 10, 30) && c.LL <= 19 && c.THK >= 46)
                tags.Add(Diag.PostawaKifotyczna);

            if (InClosed(c.PT, 20, 40) && c.LL >= 40 && c.THK < 19)
                tags.Add(Diag.PostawaLordotyczna);

            if (InClosed(c.PT, 10, 20) && c.LL >= 46 && InClosed(c.THK, 20, 45))
                tags.Add(Diag.PostawaZPrzodujacaMiednica);

            if (c.StatykaKD == StatykaKDType.Z)
                tags.Add(Diag.ZaburzeniaStatykiKonczynDolnych);
        }
    }
}

```

```

        if (tags.Count > 0)
            return (tags[0], tags); // pierwsza dopasowana jako główna (ew. ustaw własne
priorytety)

        // Zdrowe (bazowy warunek spełniony, brak postaw/zaburzeń)
        return (Diag.Zdrowe, tags);
    }

    // Jeśli nie ma ryzyko IS i nie spełnia pozostałych warunków:
    return (null, tags); // brak dopasowania do tabeli – poza definicją
}
}
}

```

Listing 13. Implementacja drzewa decyzyjnego

4.9 Studium przypadku badania pacjenta

Powyżej opisane metody zostały zastosowane na pomiarach kąta rotacji tułowia i długości kręgosłupa. Badania wykonane podczas testu Adamsa i pozwoliły na wyznaczenie wartości kąta ATR, maksimów garbów w odcinku piersiowym i lędźwiowym, ich sum oraz wyznaczenie punktów położenia poszczególnych kręgów – zastosowano do obliczeń metody opisane w rozdziałach 4.1, 4.2, 4.4. Poniżej zaprezentowano wyniki obliczeń dla przykładowego badania pacjenta w pozycji pochylonej – kolumny ATR, HS oraz Kręg.

Nr ramki pomiarowej	Kąt zmierzony [°]	Pomiar	Droga przebyta [mm]	% drogi przebytej	Abs(kąta) [°]	ATR [°]	MaxHump Th1Th12 [°]	MaxHump L1L5 [°]	HS [°]	Kręg
1.	1,798	C7	0	0,00%	1,798	2,735				C7
2.	1,590		0	0,00%	1,590					C7
3.	1,536		0	0,00%	1,536					C7
4.	1,247		0	0,00%	1,247					C7
5.	1,157		0	0,00%	1,157					C7
6.	1,425		0	0,00%	1,425					C7
7.	1,487		0	0,00%	1,487					C7
8.	1,945		0	0,00%	1,945					C7
9.	1,893		0	0,00%	1,893					C7
10.	2,109		0	0,00%	2,109					C7
11.	2,135		0	0,00%	2,135					C7
12.	2,018		0	0,00%	2,018					C7
13.	1,926		0	0,00%	1,926					C7
14.	1,915		2	0,42%	1,915					C7
15.	1,773		8	1,69%	1,773					C7
16.	1,622		22	4,64%	1,622	2,735	2,735	5,028		T1
17.	0,653		36	7,59%	0,653					T1
18.	-0,332		36	7,59%	0,332					T1
19.	-1,395		32	6,75%	1,395					T1
20.	-0,953		24	5,06%	0,953					T1
21.	0,158		18	3,80%	0,158					T1
22.	0,947		16	3,38%	0,947					T1
23.	0,626		16	3,38%	0,626					T1
24.	0,761		16	3,38%	0,761					T1
25.	0,857		16	3,38%	0,857					T1
26.	0,495		16	3,38%	0,495					T1
27.	0,467		16	3,38%	0,467					T1
28.	0,467		16	3,38%	0,467					T1
29.	0,357		18	3,80%	0,357					T1
30.	0,728		18	3,80%	0,728					T1
31.	1,008		18	3,80%	1,008					T1
32.	1,261		18	3,80%	1,261					T1
33.	1,876		18	3,80%	1,876					T1
34.	1,864		18	3,80%	1,864					T1
35.	1,751		18	3,80%	1,751					T1
36.	1,764		18	3,80%	1,764					T1
37.	1,629		18	3,80%	1,629					T1
38.	1,983		20	4,22%	1,983					T1
39.	2,005		20	4,22%	2,005					T1
40.	2,141		20	4,22%	2,141					T1

Nr ramki pomiarowej	Kąt zmierzony [°]	Pomiar	Droga przebyta [mm]	% drogi przebytej	Abs(kąta) [°]	ATR [°]	MaxHump Th1Th12 [°]	MaxHump L1L5 [°]	HS [°]	Kręg
41.	2,263		20	4,22%	2,263					T1
42.	2,332		24	5,06%	2,332					T1
43.	2,457		24	5,06%	2,457					T1
44.	2,735		24	5,06%	2,735					T1
45.	2,437		24	5,06%	2,437					T1
46.	2,306		24	5,06%	2,306					T1
47.	2,046		24	5,06%	2,046					T1
48.	1,907		24	5,06%	1,907					T1
49.	1,862		24	5,06%	1,862					T1
50.	1,241		28	5,91%	1,241					T1
51.	0,856		34	7,17%	0,856					T1
52.	0,745		30	6,33%	0,745					T1
53.	-0,359		28	5,91%	0,359					T1
54.	-0,677		28	5,91%	0,677					T1
55.	-1,509		28	5,91%	1,509					T1
56.	-1,771		28	5,91%	1,771					T1
57.	-1,474		34	7,17%	1,474					T1
58.	-1,260		54	11,39%	1,260					T2
59.	-0,591		76	16,03%	0,591					T3
60.	-0,126		92	19,41%	0,126					T4
61.	-0,049		112	23,63%	0,049					T4
62.	0,497		134	28,27%	0,497					T5
63.	0,739		148	31,22%	0,739					T6
64.	0,653		150	31,65%	0,653					T6
65.	0,883		150	31,65%	0,883					T6
66.	0,550		150	31,65%	0,550					T6
67.	0,304	T6	150	31,65%	0,304					T6
68.	0,076		152	32,07%	0,076					T6
69.	-0,511		152	32,07%	0,511					T6
70.	-0,893		158	33,33%	0,893					T6
71.	-1,149		166	35,02%	1,149					T7
72.	-1,289		172	36,29%	1,289					T7
73.	-1,031		172	36,29%	1,031					T7
74.	-1,058		172	36,29%	1,058					T7
75.	-1,280		172	36,29%	1,280					T7
76.	-1,317		172	36,29%	1,317					T7
77.	-1,710		180	37,97%	1,710					T7
78.	-1,890		190	40,08%	1,890					T8
79.	-1,509		208	43,88%	1,509					T9
80.	-1,578		238	50,21%	1,578					T11
81.	-1,750		260	54,85%	1,750					T12
82.	-1,270		262	55,27%	1,270					T12
83.	-1,489		262	55,27%	1,489					T12
84.	-0,496		260	54,85%	0,496					T12
85.	-0,387		256	54,01%	0,387					T12
86.	-0,094		256	54,01%	0,094					T12
87.	1,448		256	54,01%	1,448					T12
88.	2,142		258	54,43%	2,142					T12
89.	2,279	T12	260	54,85%	2,279					T12
90.	2,200		264	55,70%	2,200					T12
91.	1,119		284	59,92%	1,119			2,293		L1
92.	1,021		300	63,29%	1,021					L1
93.	1,164		316	66,67%	1,164					L2
94.	0,978		330	69,62%	0,978					L2
95.	1,515		338	71,31%	1,515					L3
96.	1,347		348	73,42%	1,347					L3
97.	1,676		350	73,84%	1,676					L3
98.	2,001		352	74,26%	2,001					L3
99.	1,801		352	74,26%	1,801					L3
100.	2,052	L3	356	75,11%	2,052					L3
101.	2,018		376	79,32%	2,018					L4
102.	2,293		412	86,92%	2,293					L5
103.	2,273		440	92,83%	2,273					L5
104.	1,916		460	97,05%	1,916					S1
105.	1,861		472	99,58%	1,861					S1
106.	1,689		472	99,58%	1,689					S1
107.	1,343		472	99,58%	1,343					S1
108.	1,273		472	99,58%	1,273					S1
109.	1,118		474	100,00%	1,118					S1
110.	1,233	S1	474	100,00%	1,233					S1

Tabela 70. Wyniki zastosowania metod wyznaczania kąta rotacji tułowia, sumy garbów oraz położenia poszczególnych kręgów

Wyniki pomiaru krzywizn przednio-tylnych dla przykładowego pacjenta.

Roll [°]	Faza scenariusza	Pomiar	ABS(Roll) [°]
-19,636	Faza Strzałkowa	NM	19,636
33,681	Faza Strzałkowa	LL	33,681
-14,005	Faza Strzałkowa	KW	14,005
-17,733	Faza Strzałkowa	KZ	17,733

Tabela 71. Wyniki pomiaru parametrów krzywizn przednio-tylnych

Suma kifozy wstępującej KW oraz kifozy zstępującej KZ wyznacza wartość kifozy piersiowej KP równe 31,738.

ABS(NM) [°]	ABS(LL) [°]	ABS(KP) [°]	ATR [°]	HumpSum [°]	Płeć	Wiek	Grupa ryzyka IS	Krzywizny przednio-tylne	Ocena NM	Ocena LL	Ocena KP
19,64	33,68	31,74	5,82	7,72	MALE	11	Grupa Ryzyka III IS	Prawidłowe	W normie	W normie	W normie

Tabela 72. Wyniki działania drzewa decyzyjnego

W tabeli Tabela 72 zaprezentowano wynik działania drzewa decyzyjnego dla badanego pacjenta. Pacjent został zakwalifikowany do III grupy ryzyka wystąpienia skoliozy idiopatycznej. Postawa w normie, jak i poszczególne parametry krzywizn-przednio tylnych.

4.10 Podsumowanie i wnioski

W rozdziale przedstawiono metody do automatycznego wyznaczenia parametrów wykorzystywanych w modelu badania postawy ciała, które pozwalają na ocenę grupy ryzyka i wad postawy. Dla wyznaczenia kąta rotacji tułowia oraz sumy maksimów garbów piersiowego i lędźwiowego do oceny asymetrii grzbietu opracowano metody wyznaczania parametrów wykorzystywanych w modelu badania postawy ciała, tj.:

- kąta rotacji tułowia ATR,
- sumy maksimów HS garbów piersiowego i lędźwiowego,
- położenia punktów wyznaczających poszczególne kręgi na osi drogi kręgosłupa,
- kątów krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa.

Metody te bazują na pomiarach z ortometru.

Metoda wyznaczenia kąta rotacji tułowia ATR polega na określeniu maksymalnej wartości bezwzględnej wychylenia ortometru podczas pomiarów w teście Adamsa na odcinku kręgosłupa C7-S1.

Metoda wyznaczenia sumy garbów HS polega na określeniu maksymalnych wartości bezwzględnych wychyleń w odcinkach kręgosłupa Th1-Th12 (piersiowy) oraz L1-L5 (lędźwiowy), a następnie ich zsumowaniu. Obliczenia wykonuje się podczas pomiarów ortometrem w teście Adamsa na odcinku C7-S1.

Metoda określająca, którego kręgu dotyczy wartość wychylenia, bazuje na ciągłym pomiarze kąta i przebytej drogi podczas ruchu ortometrem wzdłuż kręgosłupa w teście Adamsa oraz wykonanych przez badającego pomiarach kąta w punktach charakterystycznych.

W powiązaniu z parametrami wpisywanymi do ankiet wypełnianych przez personel medyczny pokazano ich zastosowanie w systemie eksperckim. Do opracowania systemu wykorzystano kliniczne reguły decyzyjne do wyznaczenia grupy ryzyka wystąpienia skoliozy idiopatycznej oraz rodzaju wad postawy na bazie eksperckiego drzewa decyzyjnego. Wyniki działania drzewa decyzyjnego zostały zweryfikowane przez eksperta w dziedzinie.

Pokazano wyniki działań poszczególnych metod na rzeczywistych pomiarach dla wybranego pacjenta. Wszystkie metody zostały zaimplementowane w systemie do przesiewowych badań dzieci i młodzieży.

Opracowane metody bazują na kilkudziesięciu pomiarach pacjentów przeprowadzonych przez eksperta z dziedziny potwierdzającego poprawność zastosowanych metod. Jednocześnie obecna liczba badań nie pozwala na zastosowanie zaawansowanych metod uczenia maszynowego do wyznaczenia grup ryzyka.

W planach jest przeprowadzenie wspólnych badań nad rozwojem kompleksowego programu profilaktyki i leczenia wad postawy dzieci i młodzieży z wykorzystaniem ortometru oraz systemu do badań przesiewowych z zastosowanymi rozwiązaniami będącymi efektem projektu doktorskiego. Przeprowadzone wielośrodkowe badania pozwolą na zwiększenie bazy danych pomiarów z ortometru. Większa liczba badań pozwoli na zastosowanie przedstawionych metod oraz wypracowanie nowych wykorzystujących uczenie maszynowe.

Wśród ośrodków wytypowanych do badań znajdują się: Uniwersytet Humanistyczno-Przyrodniczy im Jana Długosza w Częstochowie, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Uniwersytet im. Pavla Józefa Safarika w Koszycach, PHU Technomex w Gliwicach, Ośrodek Rehabilitacji Leczniczej w Kłobucku oraz Sieć Badawcza Łukasiewicz - Krakowski Instytut Technologiczny – Centrum Inżynierii Biomedycznej.

Przedstawione metody i wyniki badań pokazują, że **automatyczne wyznaczenie parametrów wykorzystywanych w modelu badania postawy ciała, pozwala na ocenę grupy ryzyka i wad postawy** – co udowadnia II hipotezę rozprawy.

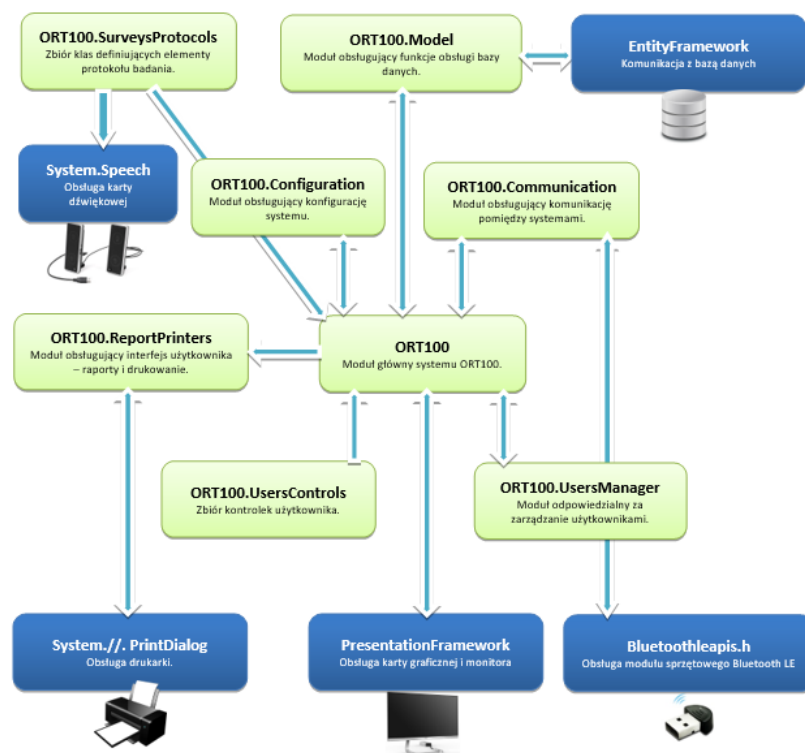
5 METODA AUTOMATYCZNEJ ANALIZY ASYMETRII GRZBIETU ORAZ KRZYWIZN PRZEDNIO-TYLNYCH KRĘGOSŁUPA

Rozdział prezentuje wyniki wdrożenia opracowanych wcześniej metod w systemie do automatycznej analizy asymetrii grzbietu i krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa. Szczegółowo opisano założenia projektowe oraz wymagania normatywne dla systemu ORT, precyzujące proces projektowania oraz rozwoju oprogramowania. Przedstawiono elementy systemu oraz przebieg i wyniki badań.

5.1 Założenia projektowe

Realizacja pracy doktorskiej ma na celu wdrożenie wyrobu medycznego na rynek. Ponieważ opracowywane oprogramowanie klasyfikowane jest jako wyrób medyczny, jego wdrożenie wymaga spełnienia rygorystycznych norm i regulacji obowiązujących w sektorze medycznym.

W początkowym etapie prac konieczne było przygotowanie założeń dla aplikacji ORT z uwzględnieniem wymagań normatywnych, które precyzują proces projektowania i rozwoju oprogramowania. Opracowano schemat architektury oprogramowania zawierający moduły programowe, który został przedstawiony na Rys. 77.



Rys. 77. Schemat architektury oprogramowania aplikacji ORT

W tabeli (Tabela 73Tabela 1) zaprezentowano moduły programowe, które wykorzystano i utworzono na potrzeby opracowania aplikacji ORT. W tabeli podano nazwę modułu, opis funkcji jaką realizuje poszczególne moduły oraz klasę bezpieczeństwa oprogramowania.

Moduły realizujące podstawowe funkcje najniższego poziomu (wg normy 62304 JEDNOSTKI PROGRAMOWE)		
Moduł	Opis funkcji	klasa oprogramowania
PresentationFramework	Obsługa karty graficznej i monitora	A
System.Speech	Obsługa karty dźwiękowej	A
EntityFramework	Komunikacja z bazą danych	A
Bluetoothleapis.h	Obsługa modułu sprzętowego Bluetooth LE	A
System.//. PrintDialog	Obsługa drukarki	A
Moduły realizujące złożone funkcje z wykorzystaniem modułów podstawowych wyższego poziomu (wg normy 62304 POZYCJE OPROGRAMOWANIA) Klasa modułów nie niższa niż wykorzystywanych modułów podstawowych		
ORT100	Moduł główny systemu ORT100. Realizacja założeń funkcjonalnych, realizacja scenariuszy działania Korzysta z modułów najniższego poziomu	A
ORT100.SurveysProtocols	Zbiór klas definiujących elementy protokołu badania.	A
ORT100.UsersManager	Moduł odpowiedzialny za zarządzanie użytkownikami.	A
ORT100.UsersControls	Zbiór kontrolek użytkownika.	A
ORT100.Configuration	Moduł obsługujący konfigurację systemu.	A
ORT100.Model	Komunikacja z bazą danych	A
ORT100.Communication	Obsługa modułu sprzętowego Bluetooth LE	A
ORT100.ReportPrinters	Wyświetlanie i obsługa druku raportów	A

Tabela 73. Wykaz modułów programowych aplikacji ORT.

Dodatkowo w procesie tworzenia założeń dla aplikacji ORT-100 konieczne było zidentyfikowanie oprogramowania SOUP (Software of Unknown Provenance), czyli komponentów oprogramowania, które nie zostały specjalnie opracowane na potrzeby danego systemu, ale są w nim wykorzystywane. Oprogramowanie SOUP może obejmować zarówno biblioteki open-source, jak i komercyjne rozwiązania firm trzecich, które stanowią istotny element funkcjonalności systemu, jednak ich wewnętrzna struktura i sposób działania nie są w pełni kontrolowane przez twórców aplikacji.

Identyfikacja i analiza oprogramowania SOUP w aplikacji ORT była kluczowym etapem procesu projektowego, ponieważ wymagała spełnienia określonych norm i wytycznych związanych z bezpieczeństwem, niezawodnością oraz zgodnością z regulacjami medycznymi. W szczególności konieczne było przeprowadzenie oceny ryzyka wynikającego z zastosowania zewnętrznych komponentów oraz określenie, w jaki sposób wpływają one na działanie systemu, przetwarzanie danych diagnostycznych i interakcję z użytkownikiem.

Jako elementy typu SOUP w aplikacji ORT zidentyfikowano EntityFramework 6.2.0 oraz NLog 4.4.12, które zostały wykorzystane do usprawnienia procesu implementacji oprogramowania. EntityFramework 6.2.0 pełni kluczową rolę w zarządzaniu danymi, umożliwiając efektywną komunikację z bazą danych oraz ułatwiając operacje na zbiorach danych w sposób zgodny z paradygmatem ORM (Object-Relational Mapping). Z kolei NLog 4.4.12 został zastosowany jako elastyczne i wydajne narzędzie do rejestrowania zdarzeń, co wspiera proces diagnostyki i monitorowania działania systemu. Włączenie tych komponentów znacząco przyczyniło się do optymalizacji rozwoju aplikacji.

Kolejnym kluczowym etapem tworzenia założeń dla oprogramowania było określenie wymagań dla aplikacji ORT (Tabela 74). Ponieważ aplikacja, opracowywana przez autora niniejszej rozprawy, miała zostać wdrożona jako wyrób medyczny, konieczne było uwzględnienie odpowiednich standardów już na etapie projektowania. W szczególności proces ten musiał być zgodny z punktem 5.2.2 normy EN 62304, który określa wymagania dotyczące analizy i specyfikacji wymagań dla oprogramowania medycznego.

Norma ta nakłada obowiązek precyzyjnego zdefiniowania funkcji aplikacji, uwzględnienia aspektów bezpieczeństwa użytkownika oraz spełnienia rygorystycznych wymagań dotyczących niezawodności i jakości działania systemu. Dlatego już na wczesnym etapie projektowania aplikacji ORT-100 kluczowe było określenie jej funkcjonalności, zgodności z regulacjami oraz zapewnienie wysokiej precyzji pomiarowej, co warunkuje jej skuteczność w zastosowaniach medycznych.

Wymaganie	Opis
a) wymagania dotyczące możliwości i wymagania funkcjonalne	
działanie (np. przeznaczenie oprogramowania, wymagania czasowe)	Celem jest utworzenie aplikacji Ortometr przeznaczonej do graficznej prezentacji wyników pomiarowych wykonywanych za pomocą urządzenia Ortometr ORT-100 oraz ich archiwizowania w bazie danych. Aplikacja ma być odpowiedzialna również za sterowanie procesem wykonywania badania do oceny wad postawy. Podstawowe funkcje związane z przeznaczeniem aplikacji: – Utworzenie konta użytkownika aplikacji, – Utworzenie profilu pacjenta, – Podgląd dostępnych badań i ich etapów, – Wybór typu badania, – Realizacja scenariusza badania w oparciu o podpowiedzi tekstowe oraz głosowe, – Prezentacja danych uzyskanych podczas badania postawy ciała, – Prezentacja danych uzyskanych podczas badania stawów obwodowych (górnych jak i dolnych), – Zapis uzyskanych danych do bazy danych pacjentów, – Tworzenie raportów z badania;
charakterystyki fizyczne (np. język oprogramowania, platforma, system operacyjny)	Oprogramowanie aplikacji zostanie wytworzone w środowisku Microsoft Visual Studio 2017 Pro. Aplikacja zostanie napisana w języku C#, do komunikacji z urządzeniem wykorzystywany będzie moduł w formie biblioteki DLL napisany w języku C++.
środowisko komputerowe w którym program ma pracować (np. sprzęt, wielkość pamięci, jednostka obliczeniowa, strefa czasowa, infrastruktura sieciowa)	Aplikacja przeznaczona będzie do stosowania na sprzęcie komputerowym spełniającym następujące warunki: – komputer PC wyposażony w interfejs Bluetooth LE (4.0), – system MS Windows 8 i późniejsze, – zalecany monitor o przekątnej co najmniej 22 cale i rozdzielczości full HD 16:9 i 16:10 (1920x1200 lub 1920x1080), - pamięć RAM min 4 GB,
Wymagania dotyczące kompatybilności (np. z uaktualnieniami, wielorakimi SOUP lub wersjami urządzenia)	Do utworzenia aplikacji zostaną wykorzystane elementy SOUP takie jak: EntityFramework.6.2.0 oraz NLog.4.4.12, które wykorzystywane są do wspomagania procesu implementacji oprogramowania.
wymagania funkcjonalne	
Wymagania ogólne Podstawową funkcją aplikacji jest graficzna prezentacja wyników pomiarowych otrzymywanych za pomocą urządzenia Ortometr ORT-100 oraz ich archiwizowanie w bazie danych. Aplikacja umożliwia również sterowanie procesem wykonywania badania do oceny wad postawy.	
b) Wejścia i wyjścia systemu oprogramowania	
Wejście: Zalogowanie do systemu	Pojawi się okno dostępu do aplikacji.
Wejście: Konfiguracja ustawień aplikacji	Wybranie sposobu sterowania ortometrem podczas badania – komendy głosowe, podpowiedzi tekstowe. Przy pierwszym użyciu konieczne będzie wprowadzenie adresu MAC urządzenia.
Wejście: Dodanie pacjenta do bazy	Aby przeprowadzić badanie konieczne będzie dodanie nowego pacjenta do bazy.
Wejście: Wybranie badania	Wybranie rodzaju badania będzie możliwe w oknie wyboru badania. Użytkownik będzie miał możliwość wyboru badania do oceny postawy ciała jak i pomiarów kątowych.
Wejście: Wykonanie badania	Badanie będzie możliwe do przeprowadzenia po wybraniu rodzaju/ obszaru badania. Użytkownik będzie musiał postępować zgodnie z poleceniami

Wymaganie	Opis
	widocznymi na ekranie monitora czy też komendami głosowymi (w zależności od wybranej opcji).
Wyjście: Prezentacja zmierzonych kątów	Podczas badania w określonych miejscach na ekranie monitora wyświetlane będą zmierzone przez urządzenie ortometr wartości kątów.
Wyjście: Prezentacja przebytej drogi	Wartości przebytej drogi ortometru podczas testu Adamsa będą prezentowane w specjalnie zaprojektowanej kontrolce.
Wyjście: Prezentacja siły nacisku	Zmierzona wartość nacisku zaprezentowana zostanie na ekranie monitora w specjalnie opracowanej kontrolce.
Wejście: Zapis wyników badania	Po przeprowadzeniu badania pojawi się przycisk Zapisz, który umożliwi zapis zmierzonych wartości w bazie.
Wejście: Eksport wyników badania	Eksport wyników badania do pliku .csv.
Wyjście: Prezentacja stanu naładowania akumulatora	Pomiar stanu naładowania akumulatora sygnalizowany będzie graficznie.
Wejście: Przyciski: Dalej, Wstecz, Zapisz	Przyciski sterujące pracą aplikacji.
Wyjście: Sygnalizacja dźwiękowa	Etapy przeprowadzania badań sterowane za pomocą podpowiedzi głosowych.
Wyjście/wejście: Komunikacja z komputerem PC przez łącze radiowe Bluetooth LE	Obsługa połączenia Bluetooth LE w celu wizualizacji i archiwizacji danych pomiarowych. Komunikacja realizowana cyklicznego, poprzez odbieranie aktualnych wyników pomiarów i informacji statusowych urządzenia.
c) interfejs między systemami oprogramowania i innymi systemami	
Komunikacja Bluetooth z urządzeniem	Aplikacja ortometr komunikuje się bezprzewodowo z urządzeniem Ortometr. Nie przewiduje się współpracy z innymi zewnętrznymi systemami.
d) alarmy generowane przez oprogramowanie, ostrzeżenia i komunikaty operatora	
Sygnalizacja zmierzonych wartości znajdujących się poza zakresem normy	Sygnalizacja za pomocą strzałki skierowanej w górę bądź w dół w zależności od tego czy pomiar przekracza maksymalny czy minimalny zakres.
Sygnalizacja zmierzonej wartości	Sygnalizacja głosowa wyniku pomiaru.
Podpowiedzi głosowe podczas badania	Polecenia głosowe sugerujące co badający powinien zrobić w danym etapie badania.
e) wymagania dotyczące zabezpieczeń	
dotyczące informacji wrażliwych	Dostęp do aplikacji mają tylko zarejestrowani użytkownicy. Zabezpieczenia przed korzystaniem z aplikacji przez niepowołane osoby.
dotyczące identyfikacji	Identyfikatory wersji oprogramowania wprowadzone w kod aplikacji
dotyczące autoryzacji	Dostęp do aplikacji mają tylko zarejestrowani użytkownicy, konieczne jest zalogowanie się poprzez podanie loginu i hasła.
dotyczące integralności komunikacji	Mechanizmy kontrolne transmisji Bluetooth LE
f) wymagania dotyczące techniki użytkowania, które są zależne od ludzkich błędów i przeszkolenia	
wspomaganie dla operacji manualnych	Podpowiedź graficzne prezentujące miejsce przyłożenia ortometru podczas badania oraz krawędź urządzenia, którą należy przyłożyć podczas badania.
wzajemne oddziaływanie człowiek urządzenie	Wizualna i akustyczna sygnalizacji opisana w poprzednich punktach
ograniczenia dotyczące personelu	w/g dokumentu: ORT-100 Dane do specyfikacji użyteczności.docx, ORT-100 Charakterystyka wyrobu.docx
obszary wymagające skupionej uwagi ludzkiej	w/g dokumentów: ORT-100 Dane do specyfikacji użyteczności.docx oraz plik zarządzanie ryzykiem
g) definicje danych i wymagania dla baz danych	
forma	Baza danych SQL

Wymaganie	Opis
dopasowanie	Dane przesyłane są z urządzenia do aplikacji ortometr przez Bluetooth LE, gdzie przechowywane są w bazie danych.
funkcja	W bazie znajdują się wszystkie informacje o pacjencie, baza umożliwia archiwizowanie wyników pomiarowych.
h) wymagania dotyczące instalacji i odbioru oprogramowania wyrobu medycznego w miejscach instalacji	
Instalacja oprogramowania	Instalacja aplikacji z nośnika CD na komputerze klienta.
Aktualizacja oprogramowania u klienta	Zdalna aktualizacja aplikacji.

Tabela 74. Zdefiniowane założenia projektowe dla aplikacji ORT.

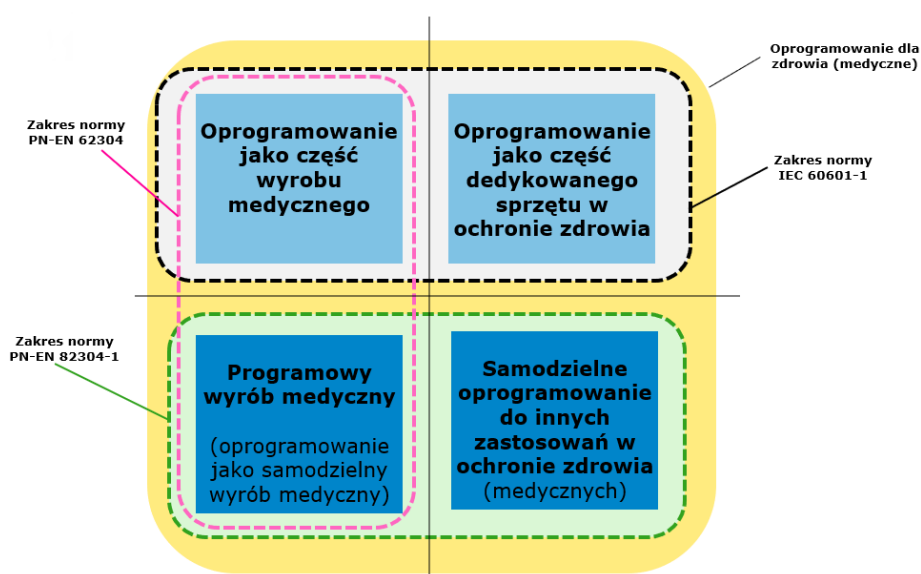
5.2 Wymagania normatywne

Niniejszy doktorat ma charakter wdrożeniowy, a jego realizacja stanowi wkład do powstania metody automatycznej analizy asymetrii grzbietu oraz krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa do wczesnego wykrywania skolioz w ramach systemu do przesiewowych badań wad postawy dzieci i młodzieży. Z powodu zamiaru wprowadzenia urządzenia na rynek konieczne jest prowadzenie całego procesu projektowania zgodnie z prawem unijnym, które wdrażane jest w krajach członkowskich w postaci rozporządzeń, decyzji i dyrektyw. Chcąc wprowadzić wyrób na rynek należy wykazać jego zgodność z obowiązującymi dyrektywami UE oraz wszelkimi krajowymi wymaganiami prawnymi. Dla dyrektyw publikowane są listy norm zharmonizowanych, których stosowanie zapewnia domniemanie zgodności z odpowiednimi wymaganiami zasadniczymi zdefiniowanymi w tych aktach.

Zgodnie z artykułem 2 pkt. 1 rozporządzenia Unii Europejskiej nr 2017/745 z dnia 5 kwietnia 2017 w sprawie wyrobów medycznych (ang. Medical Device Regulation, MDR) [177], Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2017/745 z dnia 5 kwietnia 2017 r. oraz Dyrektywą 93/42/EEC [178] opracowane w ramach doktoratu oprogramowanie spełnia definicję wyrobu medycznego i podlega wymogom stawianym dla oprogramowania. Dodatkowo oprogramowanie uznaje się za wyrób aktywny. Definicja wyrobu aktywnego wskazuje na to, iż wyrób aktywny to wyrób, którego działanie zależy od źródła energii innego niż energia generowana przez ciało ludzkie. W związku z powyższym należy spełnić wymagania jakie stawiają przepisy prawa dla wyrobów medycznych, których regulacje obejmują cały cykl życia wyrobu medycznego, a w szczególności projektowanie, opracowanie dokumentacji, ocenę zgodności, produkcję, wprowadzenie na rynek oraz utrzymanie i nadzór wyrobu po wprowadzeniu na rynek.

Zależnie od dziedziny zastosowania i platformy wykorzystywanej do uruchomienia, oprogramowanie może podlegać różnym wymaganiom dotyczącym procesu rozwoju i konserwacji, a także walidacji i utrzymania na rynku (Rys.11). Wyróżnić można:

- **Oprogramowanie jako część wyrobu medycznego - oprogramowanie wbudowane** wyrobu medycznego (PEMS/PESS), które podlega wymaganiom norm PN-EN 60601-1 i PN-EN 62304 oraz wymaganiom MDR.
- **Programowy wyrób medyczny, samodzielne oprogramowanie jako wyrób medyczny - samodzielne oprogramowanie** (wyrób programowy dla zdrowia) **zakwalifikowane jako wyrób medyczny** podlega wymaganiom norm PN-EN 62304 i PN-EN 82304-1 oraz wymaganiom MDR.
- **Oprogramowanie jako część dedykowanego sprzętu w ochronie zdrowia (medycznego) - oprogramowanie wbudowane dedykowanego sprzętu medycznego** nie zakwalifikowanego jako wyrób medyczny. Wyroby takie mogą podlegać wymaganiom normy PN-EN 60601-1 i/lub wymaganiom MDR. W zakresie procesów rozwoju i konserwacji oprogramowania zaleca się traktowanie takiego oprogramowania jako oprogramowania klasy bezpieczeństwa A i postępowanie zgodnie z odpowiednimi wymaganiami normy PN-EN 62304.
- **Samodzielne oprogramowanie do innych zastosowań w ochronie zdrowia (medycznych) - samodzielne oprogramowanie** (wyrób programowy dla zdrowia) **nie zakwalifikowane jako wyrób medyczny** może podlegać wymaganiom normy PN-EN 82304-1 i/lub wymaganiom MDR. W zakresie procesów rozwoju i konserwacji oprogramowania zaleca się traktowanie takiego oprogramowania jako oprogramowania klasy bezpieczeństwa A i postępowanie zgodnie z odpowiednimi wymaganiami normy i PN-EN 62304.



Rys. 78. Dziedziny zastosowań oprogramowania dla zdrowia. Na podstawie ryciny A.1 normy PN-EN 82304-1

Do każdego systemu oprogramowania należy przypisać klasę bezpieczeństwa oprogramowania (A, B lub C) zgodnie z ryzykiem szkody dla pacjenta, operatora lub innych osób, wynikającym z sytuacji zagrażającej, do której powstania system oprogramowania może się przyczynić zgodnie ze scenariuszem najgorszego przypadku.

Klasa bezpieczeństwa oprogramowania wg PN-EN 62304	
A	Klasa bezpieczeństwa systemu oprogramowania jest klasą A, jeśli: • system oprogramowania nie może przyczynić się do powstania sytuacji zagrażającej; lub • system oprogramowania może przyczynić się do powstania sytuacji zagrażającej, która nie powoduje nieakceptowalnego ryzyka po rozważeniu środków sterowania ryzykiem wdrożonych poza systemem oprogramowania.
B	Klasa bezpieczeństwa systemu oprogramowania jest klasą B, jeśli: • system oprogramowania może przyczynić się do powstania sytuacji zagrażającej, która powoduje nieakceptowalne ryzyko po rozważeniu środków sterowania ryzykiem wdrożonych poza systemem oprogramowania, a wynikająca z tego możliwa szkoda jest niepoważnym urazem.
C	Klasa bezpieczeństwa systemu oprogramowania jest klasą C, jeśli: • system oprogramowania może przyczynić się do powstania sytuacji zagrażającej, która powoduje nieakceptowalne ryzyko po rozważeniu środków sterowania ryzykiem wdrożonych poza systemem oprogramowania, a wynikająca z tego możliwa szkoda jest śmiercią lub poważnym urazem.

Tabela 75. Klasy bezpieczeństwa oprogramowania według normy PN-EN 62304.

Wymaganiem do spełnienia przez producenta wyrobów medycznych jest posiadanie wdrożonego systemu zarządzania jakością, opartego na normie EN ISO 13485. Jest to międzynarodowa norma zharmonizowana, wcześniej z Dyrektywą 93/42/EEC, obecnie z MDR pozwalająca wykazać producentom zdolności do dostarczenia wyrobów medycznych spełniających potrzeby klientów i zgodnych z obowiązującymi wymaganiami regulacyjnymi. Obejmuje ona szereg procesów występujących w organizacji, między innymi planowanie, zarządzanie zasobami, projektowanie, zarządzanie ryzykiem, zakupy, kontrole dostawców, przygotowanie dokumentacji, produkcję, realizację badań, audyty wewnętrzne oraz nadzór po wprowadzeniu wyrobu do obrotu. Producent musi wykazać posiadanie certyfikatu wdrożenia normy EN ISO 13485, nadanego przez akredytowaną jednostkę certyfikującą, która dodatkowo przeprowadza regularne audyty zgodności.

Na podstawie Listy norm zharmonizowanych z Dyrektywą 93/42/EEC wg Dziennika Urzędowego Unii Europejskiej C389/29 z dnia 17.11.2017 został opracowany wykaz norm

obowiązujących dla ortometru oraz oprogramowania ORT. Poniżej przedstawiono listę zidentyfikowanych wymagań normatywnych:

- **EN ISO 13485:2016 Wyroby medyczne – Systemy zarządzania jakością – Wymagania do celów przepisów prawnych.**
- **PN-EN 60601-1:2011+A1:2014-02+A12:2014-12 Medyczne urządzenia elektryczne – Część 1: Wymagania ogólne dotyczące bezpieczeństwa podstawowego oraz funkcjonowania zasadniczego.**
- **EN 60601-1-2:2015 Medyczne urządzenia elektryczne – Część 1-2: Wymagania ogólne dotyczące bezpieczeństwa podstawowego oraz funkcjonowania zasadniczego – Norma uzupełniająca: Zakłócenia elektromagnetyczne – Wymagania i badania.**
- **EN 60601-1-6:2010+A1:2015 Medyczne urządzenia elektryczne -- Część 1- 6: Wymagania ogólne dotyczące bezpieczeństwa podstawowego oraz funkcjonowania zasadniczego -- Norma uzupełniająca: Użyteczność.**
- **EN ISO 14971:2012 Wyroby medyczne –Zastosowanie zarządzania ryzykiem do wyrobów medycznych.**
- **EN 1041:2008+A1:2013 Informacje dostarczane przez wytwórcę wyrobów medycznych.**
- **EN 62304:2006 + AC:2008+A1:2015-11 Oprogramowanie wyrobów medycznych -- Procesy cyklu życia oprogramowania.**
- **EN 62366-1:2015-07 Wyroby medyczne – Część 1:Zastosowanie inżynierii użyteczności do wyrobów medycznych.**
- **EN ISO 10993-1:2009+AC:2010 Biologiczna ocena wyrobów medycznych – Część 1: Ocena i badanie w procesie zarządzania ryzykiem.**
- **EN ISO 15223-1:2016 Wyroby medyczne – Symbole do stosowania na etykietach wyrobów medycznych, w ich oznakowaniu i dostarczanych z nimi informacjach – Część 1: Wymagania ogólne**

Spośród wymienionych wyżej norm pogrubiono te, które związane są bezpośrednio z oprogramowaniem medycznym.

5.3 Elementy systemu

Zaproponowana procedura postępowania wynika z celów pracy, które przedstawiono w rozdziale poprzednim. Poszczególne etapy zostały dobrane w sposób umożliwiający przeprowadzenie badań metodami automatycznej analizy asymetrii grzbietu oraz krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa do wczesnego wykrywania skolioz w ramach systemu do przesiewowych badań wad postawy dzieci i młodzieży. Aby możliwa była realizacja celów pracy konieczne było opracowanie systemu składającego się z urządzenia pomiarowego Ortometr oraz współpracującego z nim aplikacji ORT.

5.3.1 Ortometr

Dotychczasowe protokoły oceny postawy ciała u dzieci koncentrowały się głównie na pomiarze asymetrii pleców przy pomocy skoliometru. Jednak, w odpowiedzi na rosnące potrzeby diagnostyczne, powstała potrzeba rozszerzenia panelu badania o dodatkowe parametry. Nowoczesne podejście do diagnostyki postawy ciała uwzględnia zastosowanie innowacyjnych narzędzi, które umożliwiają dokładniejszą ocenę stanu kręgosłupa i postawy ciała.

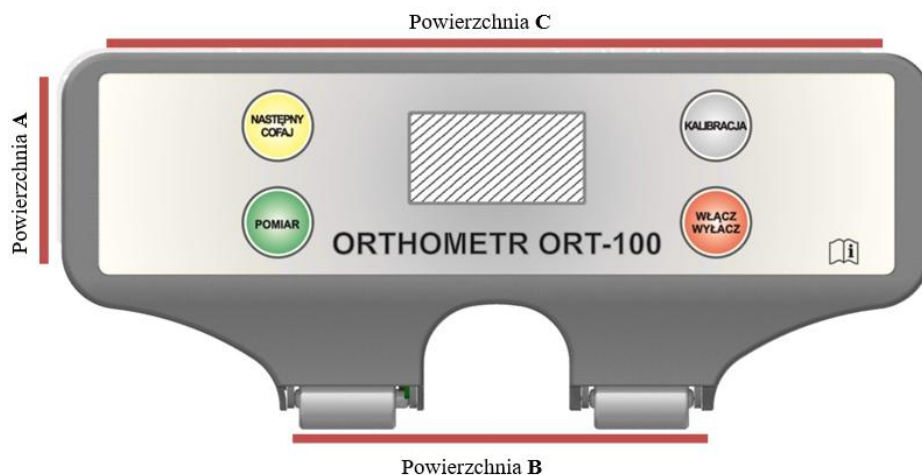
W tym celu opracowano nowy przyrząd pomiarowy Ortometr, który pozwala na dokładny pomiar nie tylko asymetrii pleców, ale także na ocenę przednio-tylnych krzywizn kręgosłupa, takich jak lordoza lędźwiowa oraz kifoza piersiowa. Urządzenie wspólnie z oprogramowaniem aplikacyjnym stanowi istotny element nowoczesnej diagnostyki skoliozy, umożliwiając bardziej precyzyjne monitorowanie zmian postawy w czasie.

Ortometr jest częścią systemu diagnostycznego służącego do oceny postawy ciała i pomiarów ortopedycznych. System składa się z urządzenia pomiarowego oraz aplikacji komputerowej.

Z wykorzystaniem Ortometru można dokonać pomiaru:

- Odległości – poprzez analizę przesunięcia rolek po ciele pacjenta.
- Pochylenia – na podstawie danych z trzech osi, wykorzystując inklinometr oparty na akcelerometrze i żyroskopie.

Ortometr może działać jako samodzielne urządzenie (tryb OFF-LINE) lub w połączeniu z aplikacją komputerową (tryb ON-LINE), a podczas badania przykładany jest do ciała w określonych obszarach, oznaczonych jako powierzchnia A, B i C co pokazano na Rys. 79.



Rys. 79. Oznaczenie powierzchni Ortometru.

Urządzenie włącza się naciśnięciem przycisku WŁĄCZ/WYŁĄCZ. Po chwili pojawia się ekran pomiarowy – urządzenie jest gotowe do pracy.. Domyślnie, po włączeniu, urządzenie będzie pracować w trybie manualnym. Naciśnięcie przycisku NASTĘPNY pozwoli na przejście do pomiarów w trybie automatycznym. Po przejściu wszystkich pozycji w tym trybie następuje powrót do trybu manualnego.



Rys. 80. Ekran pomiarowy, który wskazuje, że urządzenie jest gotowe do pracy oraz, że została nawiązywana komunikacja bezprzewodowa Bluetooth z aplikacją komputerową.

Ortometr może pracować jako samodzielne urządzenie w trybie OFF-LINE. W tym trybie urządzenie pracuje niezależnie od aplikacji komputerowej i nie przesyła danych przez transmisję Bluetooth. W trybie ręcznym można wykonywać pomiary kątowe obręczy kończyn górnych, kończyn dolnych. Z kolei w trybie automatycznym może być wykonywana następująca sekwencja badań:

- Ocena postawy ciała w płaszczyźnie strzałkowej,
- Pomiar długości pleców,
- Test Adamsa.

Ważnym etapem badania jest skalibrowanie pomiaru sylwetki pleców, które polega na wykonaniu 2-krotnego pomiaru długości pleców po ich powierzchni tuż przy wyrostkach kolczystych (paciorkach) od punktu C7 (punkt wystający wyrostka kolczystego 7-go kręgu szyjnego charakterystycznie odstającego ku tyłowi przy lekko pochylonej głowie do przodu. Raz przy wyprostowanej swobodnej postawie, drugi raz w pełnym skłonie. Podczas wykonywania pomiaru ruch powinien być płynny, a ortometr ustawiony pod odpowiednim kątem do płaszczyzny pleców. W przypadku, gdy ustawienie ortometru lub przesuw są nieodpowiednie na ekranie pojawiają się ostrzegawcze komunikaty.

Pomiar w pozycji wyprostowanej (Droga P)

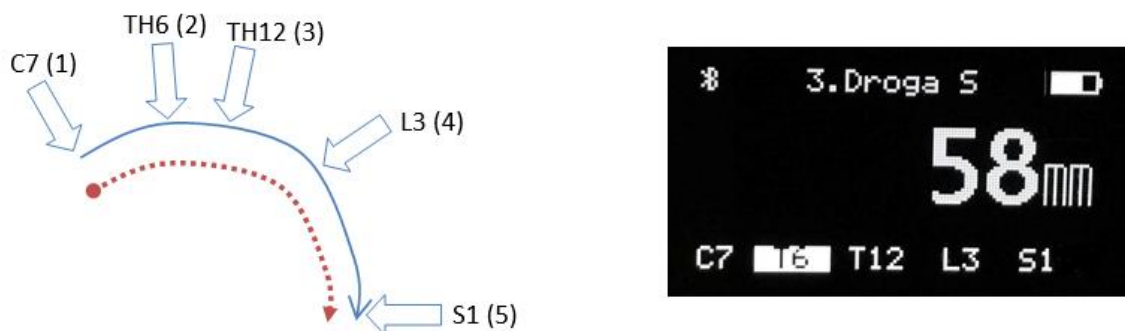
Podczas pomiaru w pozycji wyprostowanej, Ortometr należy przyłożyć do pleców w punkcie C7. Przed rozpoczęciem pomiaru należy sprawdzić, czy wartość drogi na wyświetlaczu wynosi zero. Jeżeli nie, naciśnięcie przycisku wyzerowania pomiaru drogi. Podczas przesuwania ortometru na ekranie wyświetlana jest aktualna odległość od punktu C7. Wyniki pomiarów nie są zapamiętywane.



Rys. 81. Pomiar drogi w pozycji wyprostowanej.

Pomiar w skłonie (Droga S)

Podczas pomiaru w skłonie, Ortometr należy przyłożyć do pleców w punkcie C7. Podobnie jak przy poprzednim pomiarze przed rozpoczęciem badania należy wyzerować wartość drogi. Podczas przesuwania ortometru po plecach na ekranie wyświetlana jest aktualna odległość od punktu C7.



Rys. 82. Pomiar drogi w skłonie.

W trybie ON-LINE ortometr pracuje pod kontrolą aplikacji komputerowej. Tryb pracy i rodzaj wykonywanego pomiaru wskazuje aplikacja. Lekarz naciska przyciski w ortometrze zgodnie z poleceniami aplikacji. Użycie przycisku POMIAR pozwala na przesłanie i zapamiętanie w aplikacji aktualnego wyniku pomiarów.

5.3.2 Architektura bazy danych

Problem podstawowy – w jaki sposób zaprojektować uniwersalną bazę danych przechowującą dane ośrodków, pacjentów, użytkowników systemu, scenariusze badań, ich etapy oraz wyniki, pozwalającą na dodawanie nowych scenariuszy, możliwie bez modyfikacji struktury bazy danych. Pierwotny zbiór scenariuszy obejmował następujące elementy:

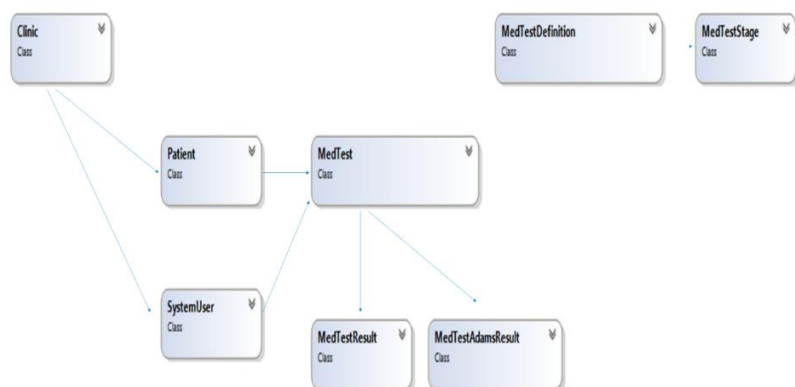
- ocena postawy ciała,
- ocena płaszczyzny strzałkowej,
- pomiar symetrii pleców w Teście Adamsa,
- inne parametry oceny postawy oraz podsumowanie badania,
- pomiary kątowe w obręczy barkowej,
- pomiary kątowe stawu łokciowego,
- pomiary kątowe stawu kolanowego,
- pomiary kątowe stawu biodrowego,
- pomiary kątowe stawu promieniowo-nadgarstkowego,
- pomiary kątowe stawu skokowo-goleniowego.

Dane gromadzone w bazie danych:

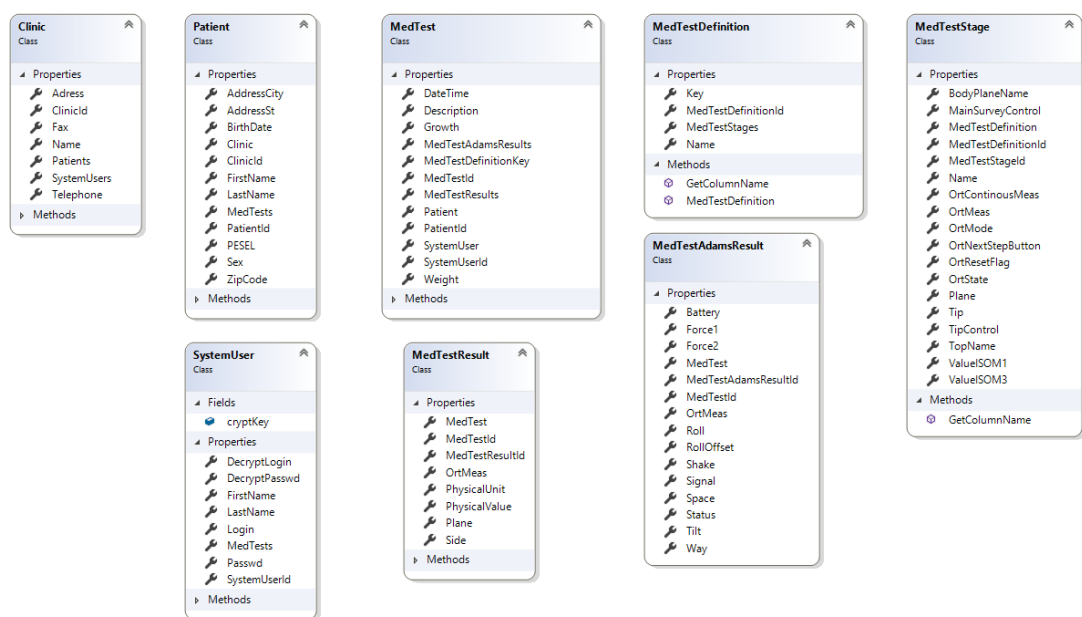
- ośrodki wykonujące badania.
- użytkownicy systemu.
- pacjenci.
- scenariusze badań – rodzaj/nazwa badania, opis badania.
- etapy badania – co mierzymy i w jakich jednostkach, w jaki sposób prezentujemy dane, pomiar ciągły czy zatrzaskiwany przez operatora, podpowiedzi lektora, opis etapu, sposób przejścia do następnego etapu.
- wyniki badań.

W klasycznym podejściu do projektowania i tworzenia aplikacji bazodanowej (Data Driven Design, Database First) najpierw następuje określenie danych gromadzonych przez system, następnie zaprojektowanie schematu bazy danych. Najczęściej jest to relacyjna baza danych a dostęp do niej realizowany jest za pomocą języka SQL. Współczesne silniki baz danych zapewniają odpowiednią wydajność, umożliwiają zastosowanie odpowiednich struktur, typów danych, indeksów, powiązań, kluczy obcych, realizujące wielodostęp i poziomy uprawnień. Aplikacja tworzona jest na podstawie zaprojektowanego schematu bazy danych, w pierwszej kolejności odwzorowywane są poszczególne tabele bazy danych do odpowiadających im klas (ręcznie lub za pomocą odpowiednich narzędzi), po czym następuje oprogramowanie logiki.

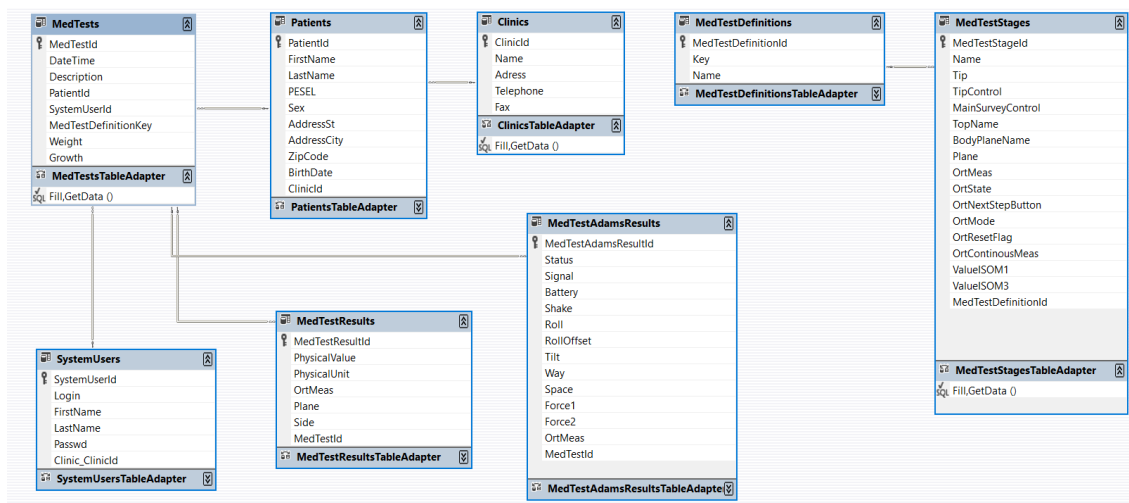
Biblioteka Entity Framework ułatwia powiązanie danych w bazie danych z obiektami w aplikacji – wspiera model DataBase First, Model First, CodeFirst. W modelu CodeFirst najpierw następuje zdefiniowanie klas odpowiadających modelowi bazy danych, a struktura bazy danych automatycznie utworzona zostaje na podstawie modelu bazy danych.



Rys. 83. Model danych zastosowany w aplikacji ORT i powiązania między nimi.



Rys. 84. Model – atrybuty klas dostępnych zastosowanych w aplikacji ORT.



Rys. 85. Struktura relacyjnej bazy danych odpowiadająca modelowi EntityFramework

```

using ...

namespace ORT100.Model.Persistance.EntityFramework
{
    public class ORT100Context : DbContext
    {
        public DbSet<Clinic> Clinics { get; set; }
        public DbSet<Patient> Patients { get; set; }
        public DbSet<SystemUser> SystemUsers { get; set; }
        public DbSet<MedTest> MedTests { get; set; }
        public DbSet<MedTestDefinition> MedTestDefinitions { get; set; }
        public DbSet<MedTestStage> MedTestStages { get; set; }
        public DbSet<MedTestResult> MedTestResults { get; set; }
        public DbSet<MedTestContinuousResult> MedTestContinuousResults { get; set; }

        public ORT100Context(string dbName, string instanceName) ...

        protected override void OnModelCreating(DbModelBuilder modelBuilder) ...

        public void CreateMedTestDefinitions() ...
    }
    public class ORT100DBInitializer : CreateDatabaseIfNotExists<ORT100Context>
    {
        protected override void Seed(ORT100Context context)
        {
            context.CreateMedTestDefinitions();
            base.Seed(context);
        }
    }
}

```

Listing 14. Fragment definicji kontekstu bazy danych

Poniżej przedstawiono fragment definicji dwóch przykładowych encji – pacjenta i ośrodka wykonującego badania

```

using ...

namespace ORT100.Model.Entities
{
    public class Patient
    {
        public Patient()
        {
            this.MedTests = new HashSet<MedTest>();
        }

        public int PatientId { get; set; }

        public String FirstName { get; set; }
        public String LastName { get; set; }
        public String PESEL { get; set; }
        public PatientSex Sex { get; set; }

        public String AddressSt { get; set; }
        public String AddressCity { get; set; }
        public String ZipCode { get; set; }

        public DateTime BirthDate { get; set; }

        public int ClinicId { get; set; }
        public virtual Clinic Clinic { get; set; }

        public virtual ICollection<MedTest> MedTests { get; set; }

        static public string GetColumnName(String an) ...
    }

    public class Clinic
    {
        public Clinic()
        {
            this.Patients = new HashSet<Patient>();
            this.SystemUsers = new HashSet<SystemUser>();
        }

        public int ClinicId { get; set; }

        public string Name { get; set; }

        public string Adress { get; set; }

        public string Telephone { get; set; }

        public string Fax { get; set; }

        public virtual ICollection<Patient> Patients { get; set; }
        public virtual ICollection<SystemUser> SystemUsers { get; set; }

        static public string GetColumnName(String an) ...
    }
}

```

Listing 15. Fragment definicji encji danych osobowych pacjenta i ośrodka wykonującego badania

Szczególną rolę w strukturze bazy danych systemu pełnią tabele MddTestDefinitions oraz MddTestStages, które definiują obsługiwane przez system scenariusze badań oraz ich etapów. Tabela MddTestStages zawiera m.in. konfiguracje obiektów-kontrolki odpowiedzialnych za interfejs użytkownika w danym etapie. Na podstawie danych w rekordzie etapu aplikacja w kolejnych krokach scenariusza badania dynamicznie tworzy odpowiednią kontrolkę. Rekord etapu zawiera również grupę atrybutów związanych ze sterowaniem ortometru podczas pomiaru:

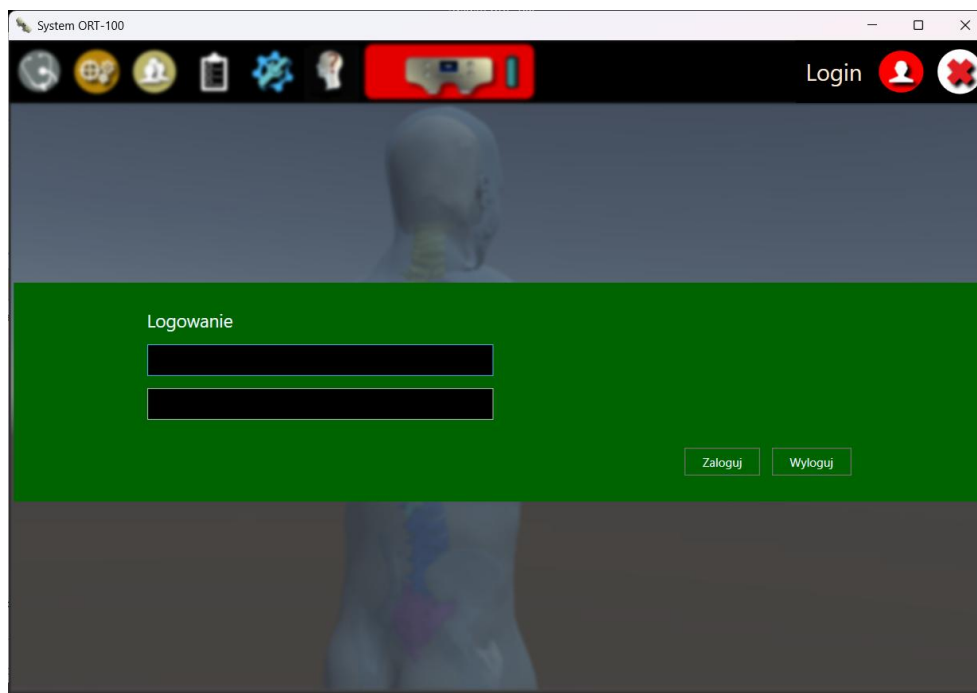
- OrtMeas - określa jaki parametr jest mierzony podczas etapu,
- OrtState - dodatkowy parametr określający stan kontrolki,
- OrtNextStepButton - określa klawisz ortometru odpowiedzialny za przejście do następnego etapu,
- OrtMode - określa tryb pracy ortometru ustawiany po wejściu do danego etapu,
- OrtResetFlag - określa sposób zerowania urządzenia po wejściu do danego etapu,
- OrtContinuousMeas - określa czy w danym etapie następuje pomiar ciągły (wykorzystywane w teście Adamsa, wszystkie ramki pomiarowe trafiają do bazy danych do tabeli MedTestContinuousResult).

Bazując na wartościach powyższych atrybutów aplikacja steruje ortometrem i odpowiednio reaguje na jego stan.

5.3.3 Aplikacja ORT

Aplikacja ORT umożliwia dwukierunkową komunikację z ortometrem w standardzie Bluetooth LE. Oprogramowanie korzysta z bazy danych systemu zawierającą dane pacjentów, użytkowników systemu, scenariusze realizowanych badań oraz ich wyniki. Scenariusze badań systematyzują poszczególne procedury pomiarowe, zawierają szczegółowe instrukcje dla wykonującego badanie - wyniki badań prezentowane są w sposób numeryczny oraz graficzny.

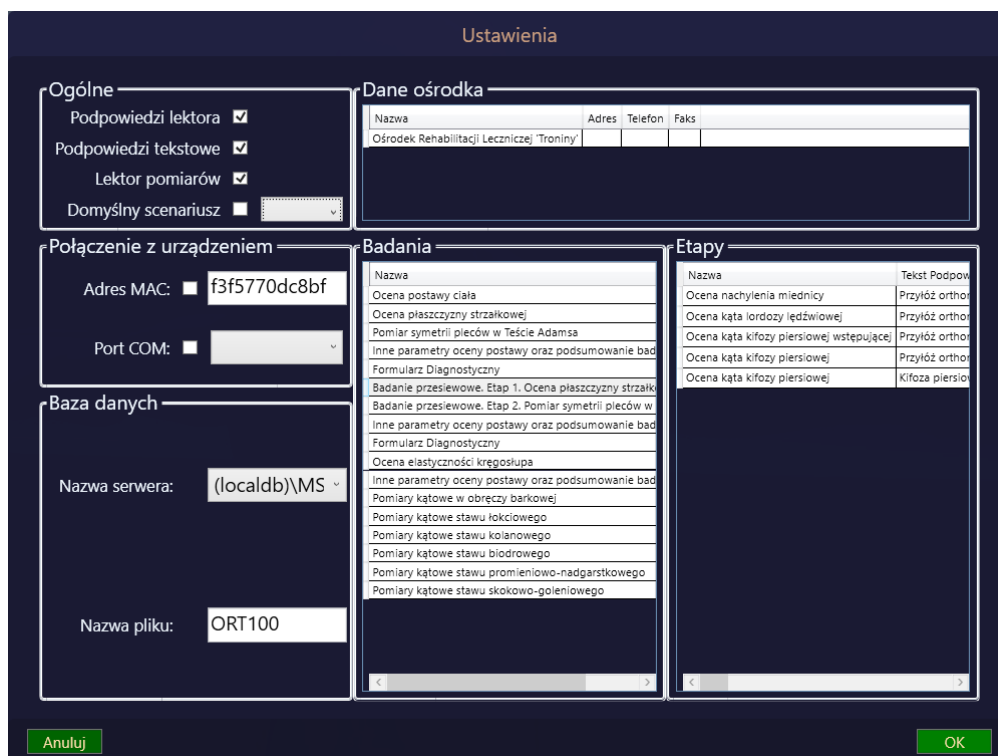
Oprogramowanie wspomaga lekarza w przeprowadzaniu badań, prezentuje wyniki pomiarów oraz ułatwia podejmowanie decyzji diagnostycznych i terapeutycznych. Dodatkowo system posiada możliwość pomiaru liniowego co pozwala na pomiar ruchomości odcinkowej kręgosłupa. Aplikacja ORT przeznaczona jest do graficznej prezentacji wyników pomiarowych wykonywanych za pomocą urządzenia Ortometr oraz ich przetwarzania i archiwizowania w bazie danych. Głównym zadaniem aplikacji komputerowej jest sterowanie procesem wykonywania badania do oceny wad postawy.



Rys. 86. Okno logowania użytkownika systemu

Aplikacja Ortometr pozwala na:

- utworzenie konta użytkownika,
- utworzenie profilu pacjenta,
- konfigurację programu z podglądem dostępnych scenariuszy badań i ich etapów,



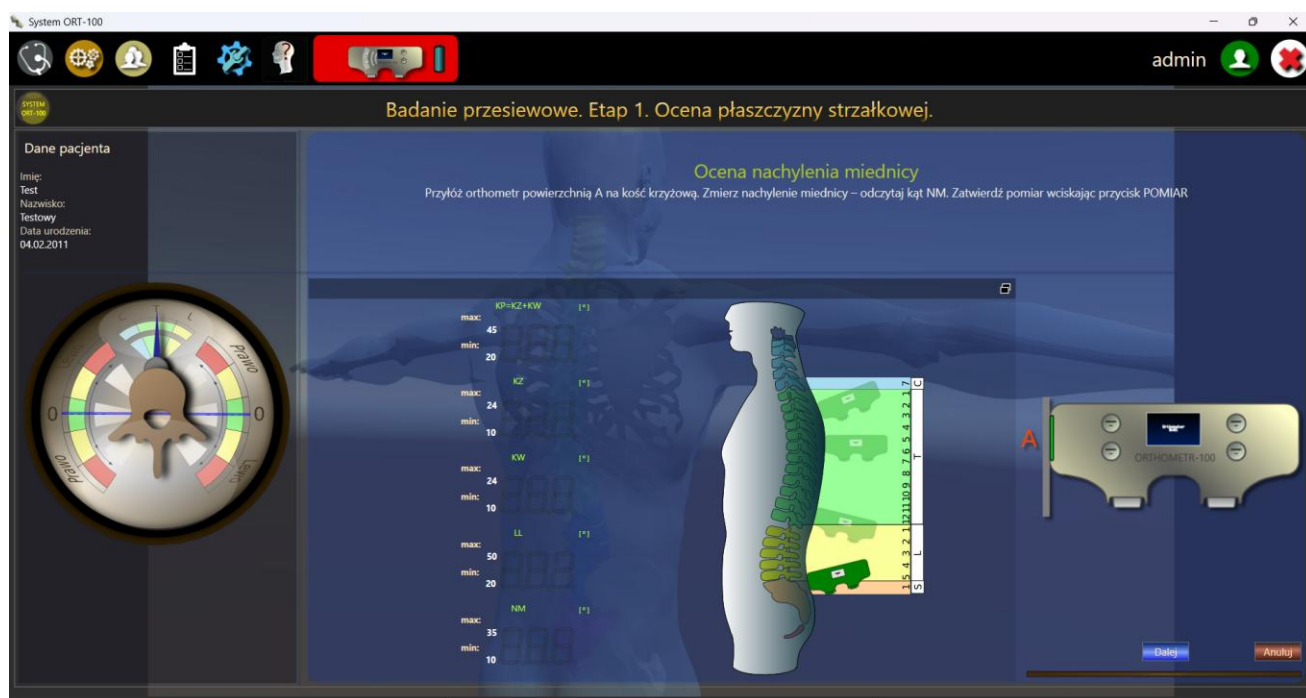
Rys. 87. Konfiguracja programu i scenariuszy badań

- wybór typu badania,



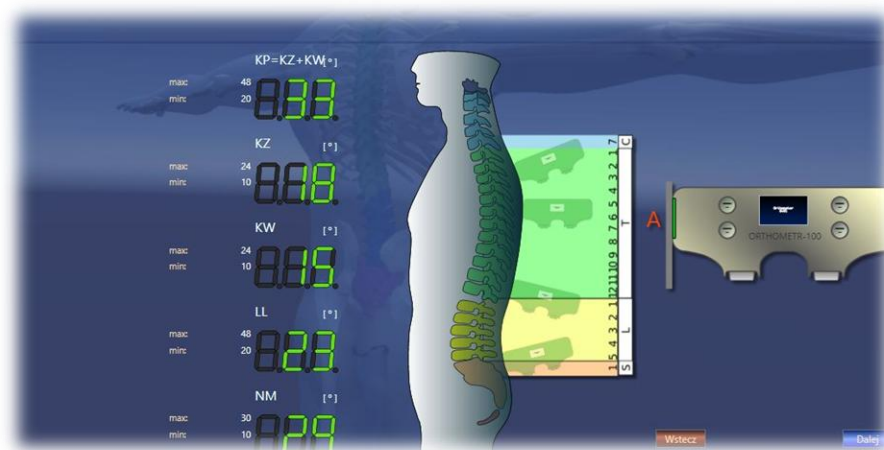
Rys. 88. Okno wyboru rodzaju badania

- Realizację scenariusza badania w oparciu o odpowiedzi tekstowe oraz głosowe,



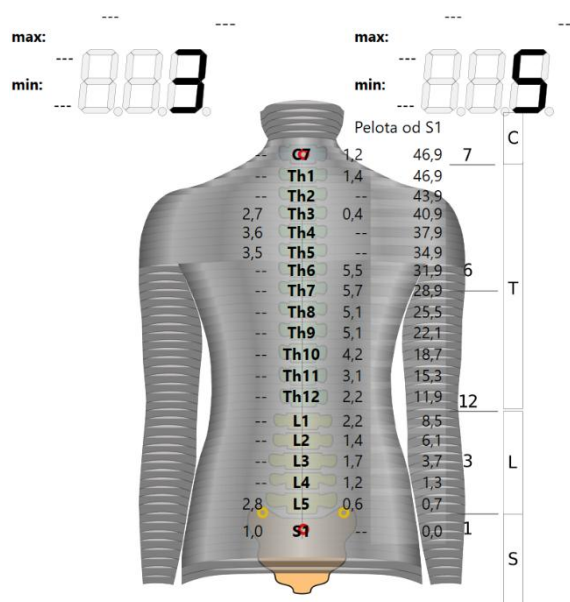
Rys. 89. Okno realizacji oceny płaszczyzny strzałkowej w badaniu przesiewowym

- Prezentację danych uzyskanych podczas badania postawy ciała,



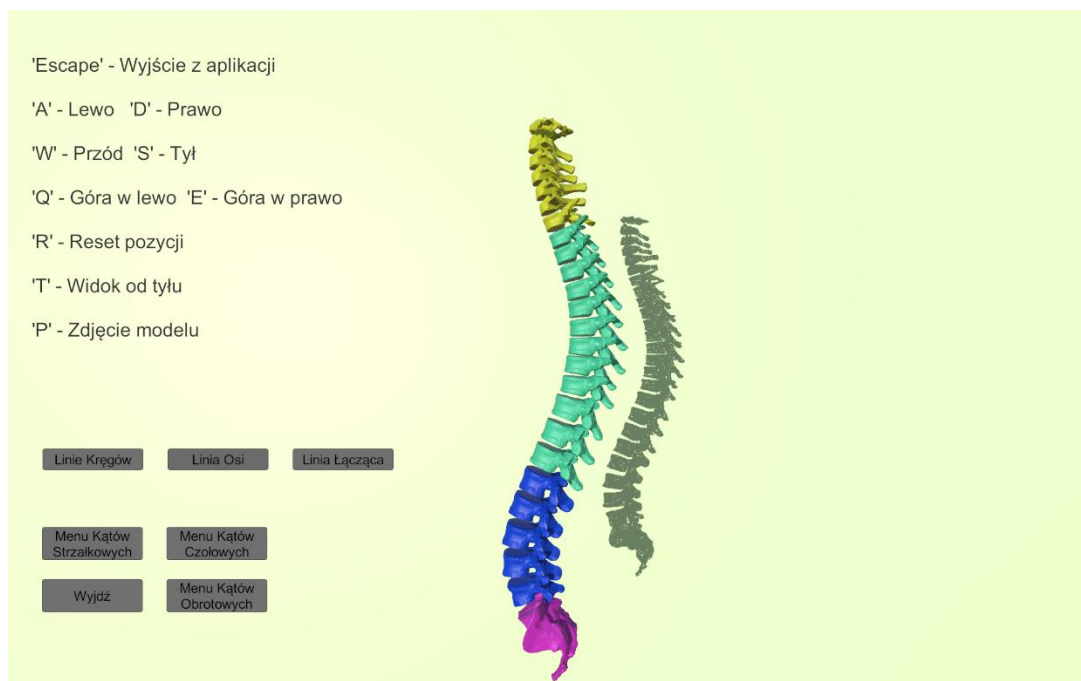
Rys. 90. Prezentacja wyników pomiarów testu Adamsa - wartości kątów rotacji tułowia w poszczególnych odcinkach kręgosłupa.

- Prezentację danych uzyskanych podczas badania stawów obwodowych (górnych jak i dolnych),
- Zapis uzyskanych danych do bazy danych pacjentów,
- Podgląd wyników badania,



Rys. 91. Wizualizacja wyników pomiaru kąta rotacji tułowia na poszczególnych kręgach

- Tworzenie raportów z badania.
- Prototypowy moduł wizualizacji kręgosłupa 3D



Rys. 92. Ekran modułu wizualizacji kręgosłupa 3D

5.4 Scenariusze badań

Baza danych systemu w opisanej w rozdziale 5.3.2 tabeli MddTestDefinitions definiuje następujące grupy scenariuszy:

	Grupa scenariuszy	Nazwa scenariusza
1	backbone	Ocena postawy ciała
2	backbone.1	Ocena płaszczyzny strzałkowej
3	backbone.2	Pomiar symetrii pleców w Teście Adamsa
4	backbone.3	Inne parametry oceny postawy oraz podsumowanie badania
5	backbone.4	Formularz Diagnostyczny
6	spineScreening.1	Badanie przesiewowe. Etap 1. Ocena płaszczyzny strzałkowej
7	spineScreening.2	Badanie przesiewowe. Etap 2. Pomiar symetrii pleców w Teście Adamsa
8	spinescreening.3	Inne parametry oceny postawy oraz podsumowanie badania
9	spinescreening.4	Formularz Diagnostyczny
10	spineFlexibility.1	Ocena elastyczności kręgosłupa
11	spineFlexibility.2	Inne parametry oceny postawy oraz podsumowanie badania
12	shoulder	Pomiary kątowe w obręczy barkowej
13	elbow	Pomiary kątowe stawu łokciowego
14	knee	Pomiary kątowe stawu kolanowego
15	hip	Pomiary kątowe stawu biodrowego
16	wrist	Pomiary kątowe stawu promieniowo-nadgarstkowego
17	ankle	Pomiary kątowe stawu skokowo-goleniowego

Tabela 76. Scenariusze badań dostępne w systemie ORT

Grupy *backbone*, *spineScreening* oraz *spineFlexibility* obejmują scenariusze badań krzywizn kręgosłupa i asymetrii pleców w różnych konfiguracjach. Najszerszą konfigurację stanowi grupa *backbone*, grupa *spineScreening* definiuje etapy typowe dla badania przesiewowego

(podzbiór *backbone*), natomiast *spineFlexibility* zawiera tylko etapy pomiaru długości kręgosłupa w celu określenia elastyczności kręgosłupa.

Etapy poszczególnych scenariuszy są zapisane w tabeli MedTestStages, poniżej przedstawiono jej wycinek zawierający definicje etapów w scenariuszu badania przesiewowego wraz ze szczegółowymi instrukcjami dla prowadzącego badanie.

Id	Etap scenariusza	Informacje dla użytkownika
27	Ocena nachylenia miednicy	Przyłóż ortometr powierzchnią A na kość krzyżową. Zmierz nachylenie miednicy – odczytaj kąt NM. Zatwierdź pomiar wciskając przycisk POMIAR
28	Ocena kąta lordozy lędźwiowej	Przyłóż ortometr powierzchnią A na przejście lędźwiowo – piersiowe w miejscu L1 - Th12. Zmierz wartość lordozy lędźwiowej – odczytaj kąt LL. Zatwierdź pomiar wciskając przycisk POMIAR.
29	Ocena kąta kifozy piersiowej wstępującej	Przyłóż ortometr pionowo powierzchnią A na część szczytową kifozy piersiowej. Zmierz wartość kifozy piersiowej wstępującej – odczytaj kąt KW. Zatwierdź pomiar wciskając przycisk POMIAR.
30	Ocena kąta kifozy piersiowej	Przyłóż ortometr pionowo powierzchnią A na część zstępującą kifozy piersiowej w okolicy między Th1 a Th3. Zmierz wartość kifozy piersiowej zstępującej, odczytaj kąt KZ. Zatwierdź pomiar wciskając przycisk POMIAR.
31	Ocena kąta kifozy piersiowej	Kifoza piersiowa KP jest sumą kifozy wstępującej i kifozy zstępującej. Naciśnij przycisk NASTĘPNY aby przejść do wykonania testu Adamsa
32	Przygotowanie i rozpoczęcie badania - Test Adamsa. Pomiar na wysokości C7	Ustaw badanego tyłem do badającego w pozycji stojącej na równo wyprostowanych nogach w lekkim rozkroku (ok. 10 -15 cm odległości między kostkami przysiódkowymi). Oznacz znacznikiem punkty na wyrostkach kolczystych kręgów C7,Th6, Th12, L3 oraz S1 – pierwszy krąg krzyżowy czyli poziom kolców biodrowych tylnych górnych. Aby rozpocząć wykonanie testu poleć badanemu pochylić głowę do przodu, przyłóż ortometr powierzchnią B na wysokości kręgu C7. Naciśnij przycisk POMIAR.
33	Pomiar na wysokości Th6	Przesuwając stopniowo ortometr w dół na wysokości wyrostka kolczystego Th6 zatwierdź pomiar wciskając przycisk POMIAR
34	Pomiar na wysokości Th12	Na wysokości wyrostka kolczystego Th12 zatwierdź pomiar wciskając przycisk POMIAR
35	Pomiar na wysokości L3	Na wysokości wyrostka kolczystego L3 zatwierdź pomiar wciskając przycisk POMIAR
36	Pomiar na wysokości S1	Na wysokości S1 zatwierdź pomiar wciskając przycisk POMIAR
37	Podsumowanie	Opis przebiegu badania
38	Formularz diagnostyczny	Postępowania dla dziecka zagrożonego skoliozą (PiLS)

Tabela 77. Fragment definicji etapów scenariusza badania przesiewowego.

5.4.1 Scenariusz postępowania podczas wykonywania testu Adamsa

Pomiar długości pleców w pozycji stojącej

Pierwszy etap polega na pomiarze długości pleców pacjenta w pozycji stojącej. Jest to kluczowy krok, umożliwiający precyzyjne określenie punktów odniesienia dla dalszych badań.

Instrukcje przygotowania pacjenta do pomiaru za pomocą urządzenia Ortometr:

1. Pozycja pacjenta:

Pacjent powinien przyjąć pozycję swobodnie wyprostowaną, stojąc tyłem do osoby przeprowadzającej badanie.

2. Oznaczenie punktów pomiarowych:

Na wyrostkach kolczystych kręgów należy zaznaczyć punkty pomiarowe w następujących lokalizacjach:

- C7 (siódmy kręg szyjny),
- Th6 (szósty kręg piersiowy),
- Th12 (dwunasty kręg piersiowy),
- L3 (trzeci kręg lędźwiowy),
- S1 (pierwszy krąg krzyżowy, na poziomie tylnych górnych kolców biodrowych).

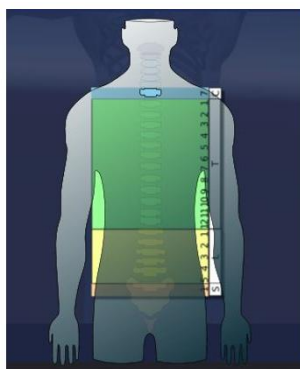
3. Kontrola urządzenia:

Po oznaczeniu punktów pomiarowych na ciele pacjenta, należy nacisnąć przycisk „NASTĘPNY” na urządzeniu Ortometr, aby kontynuować pomiar.

Przebieg badania za pomocą ortometru:

1. Początek pomiaru

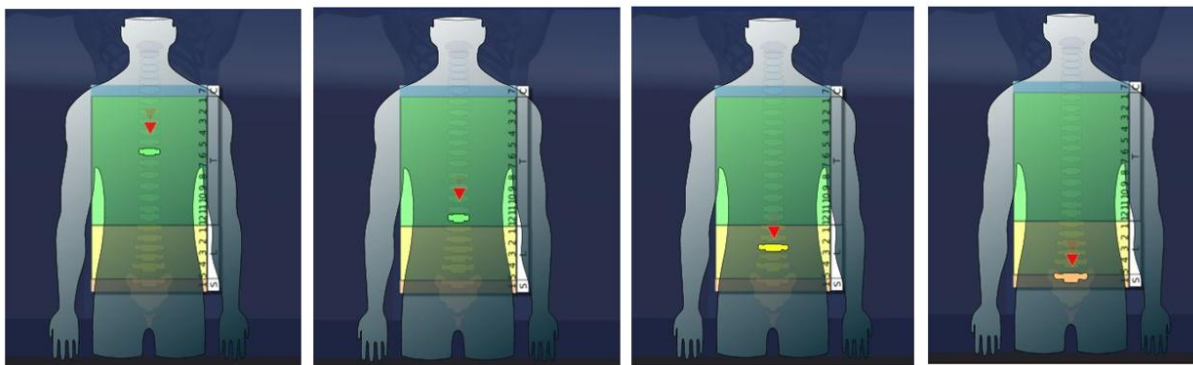
- Ortometr należy przyłożyć powierzchnią B na wysokości wyrostka kolczystego C7.
- Następnie zatwierdzić pomiar, naciskając przycisk POMIAR.



Rys. 93. Przyłożenie ortometru powierzchnią B na wysokości wyrostka kolczystego kręgu C7 (widok z okna aplikacji).

2. Kolejne etapy pomiaru

- Stopniowo przesuwaj ortometr wzdłuż pleców pacjenta w dół, utrzymując stały kontakt rolek przyrządu z ciałem pacjenta.
- Na wysokości kolejnych wyrostków kolczystych należy zatwierdzać pomiary, naciskając przycisk POMIAR:
 - Th6 (szósty kręg piersiowy),
 - Th12 (dwunasty kręg piersiowy),
 - L3 (trzeci kręg lędźwiowy),
 - S1 (pierwszy krąg krzyżowy).



Rys. 94. Przesunięcie ortometru wzdłuż pleców pacjenta, przy jednoczesnym utrzymaniu kontaktu rolek z ciałem, obejmuje kolejne etapy pomiaru na różnych poziomach kręgosłupa. Ortometr jest precyzyjnie ustawiany na wysokości wyrostka kolczystego kręgu Th6, następnie przemieszcza się go w dół, aż do poziomu Th12. Proces kontynuuje się, przesuwając ortometr w kierunku dolnej części pleców, aż osiągnie wysokość wyrostka kolczystego L3, a na końcu – S1. Każdy etap zachowuje nieprzerwaną interakcję z ciałem pacjenta, zapewniając precyzyjne pomiary na każdym poziomie kręgosłupa.

3. Zakończenie etapu

- Po zakończeniu pomiarów na wszystkich punktach, należy nacisnąć przycisk NASTĘPNY, aby przejść do drugiego etapu.

Pierwszy etap pozwala na dokładne zmierzenie długości pleców pacjenta w pozycji stojącej, stanowiąc fundament do dalszej oceny postawy oraz ruchomości kręgosłupa

Pomiar długości pleców w skłonie

Drugi etap obejmuje pomiar długości pleców w skłonie, co pozwala na ocenę ruchomości i elastyczności kręgosłupa.

Przygotowanie do badania:

1. Pozycja pacjenta:

Pacjent przyjmuje pozycję swobodnie wyprostowaną, stojąc tyłem do badającego, z głową pochyloną maksymalnie do przodu.

2. Ustawienie ortometru:

Ortometr należy ustawić na wysokości kręgu C7. Następnie, stopniowo przesuwaj ortometr wzdłuż pleców pacjenta, równocześnie z powolnym pochylaniem się pacjenta.

Przebieg badania:

1. Ustawienie ortometru:

Ortometr powinien być prostopadły do aktualnie mierzonego odcinka kręgosłupa.

2. Technika pomiaru:

- Kręgosłup w danym fragmencie powinien osiągnąć maksymalne zgięcie, czyli być równoległy do podłoża.

- Obie rolki ortometru muszą toczyć się po obu stronach kręgosłupa, zachowując równą odległość od wyrostka kolczystego i stały nacisk.
- Skłon powinien być wykonywany w osi środkowej ciała, co należy kontrolować podczas badania.

Zatwierdzanie pomiarów

1. Rozpoczęcie pomiaru:

Ustaw ortometr na wysokości C7 i naciśnij przycisk POMIAR.

2. Kolejne pomiary:

Na kolejnych poziomach kręgosłupa zatwierdź pomiary w następującej kolejności:

- Th6,
- Th12,
- L3,
- S1.

3. Zakończenie pomiaru:

Po zebraniu wszystkich pomiarów, naciśnij przycisk NASTĘPNY, aby przejść do Testu Adamsa.

Test Adamsa – Procedura badania

Test Adamsa jest podstawowym badaniem przesiewowym stosowanym do oceny asymetrii kręgosłupa i wykrywania skrzywień w płaszczyźnie czołowej, szczególnie w diagnostyce skoliozy.

Przygotowanie do badania:

1. Pozycja pacjenta:

Pacjent stoi tyłem do badającego w pozycji wyprostowanej, z nogami ustawionymi w lekkim rozkroku (około 10–15 cm między kostkami przyśrodkowymi).

2. Warunki badania:

Warunki są analogiczne do pomiaru długości w skłonie, czyli pacjent powinien przyjąć odpowiednią postawę, umożliwiającą dokładne pomiary.

3. Rozpoczęcie badania:

Badanie rozpoczyna się od skłonu głowy do przodu. Badający przykładą ortometr powierzchnią B na wysokości kręgu C7 i zatwierdza pomiar.

Przebieg badania:

1. Przesuwanie ortometru:

Ortometr jest stopniowo przesuwany w dół wzdłuż kręgosłupa, zgodnie z naturalnym ruchem ciała pacjenta.

2. Zatwierdzanie pomiarów:

Pomiary należy zatwierdzać na wysokości kolejnych wyrostków kolczystych: Th6, Th12, L3, S1.

Test Adamsa pozwala na ocenę symetrii tułowia oraz wykrycie ewentualnych rotacji kręgow, które mogą wskazywać na obecność skoliozy strukturalnej.

5.4.2 Scenariusz postępowania podczas wykonywania pomiarów kątowych obręczy kończyn dolnych

Pomiary kątowe obręczy kończyn dolnych są kluczowym elementem oceny funkcjonalnej narządu ruchu, szczególnie w diagnostyce ortopedycznej, neurologicznej oraz w rehabilitacji. Pozwalają one na precyzyjne określenie zakresu ruchomości w stawach biodrowych, kolanowych oraz skokowo-goleniowych, co jest istotne zarówno w ocenie stanu pacjenta, jak i monitorowaniu postępów terapii.

W badaniu wykorzystywane są specjalistyczne narzędzia, takie jak ortometr, które umożliwiają dokładne pomiary kątowe w różnych płaszczyznach. Procedura obejmuje analizę ruchów zgięcia, wyprostu, odwodzenia, przywodzenia oraz rotacji, co pozwala na kompleksową ocenę biomechaniki kończyn dolnych.

Szczególną uwagę poświęca się badaniu stóp, które odgrywają istotną rolę w teście AFAB. Test ten uwzględnia m.in. kąt rotacji tułowia (ATR), funkcjonalną długość kończyn dolnych (FLL), krzywiznę kręgosłupa w płaszczyźnie strzałkowej oraz hipermobilność stawów według skali Beighton. Dzięki temu możliwe jest dokładne określenie wpływu biomechaniki kończyn dolnych na postawę ciała i funkcjonowanie całego układu ruchu.

Dokładna analiza kątowa kończyn dolnych pozwala na ocenę funkcjonalności stawów, a tym samym wykrycie ewentualnych nieprawidłowości biomechanicznych. Z wykorzystaniem ortometru możliwe jest badanie zakresu ruchomości zarówno stawu biodrowego, kolanowego, jak i skokowo-goleniowego. Jednak w teście AFAB szczególną uwagę poświęca się stawowi skokowo-goleniowemu, a zwłaszcza pomiarowi długości stopy, który ma istotne znaczenie dla oceny biomechaniki kończyn dolnych oraz wpływu na postawę ciała. Dlatego też, w tym punkcie zostanie omówiona procedura pomiarowa dotycząca zakresu ruchomości stawu skokowo-goleniowego.

Staw skokowo – goleniowy

Ocena ruchomości stawu skokowo-goleniowego odbywa się w płaszczyźnie strzałkowej, gdzie analizowane są ruchy wyprostu (zgięcia grzbietowego) i zgięcia podszwowego. Zakres normatywny dla tych ruchów wynosi **20° – 0° – 45°**.

Procedura badania:

1. Przygotowanie do pomiaru

Pacjent powinien znajdować się w pozycji leżącej z wyprostowanym kolaniem. Stopa ustawiona jest w pozycji pośredniej – prostopadle do powierzchni kozetki.

2. Pomiar kąta wyprostu (zgięcia grzbietowego)

- Przyłożyć ortometr powierzchnią C do płaszczyzny podeszwy stopy.
- Wyzerować urządzenie.
- Polecieć pacjentowi wykonanie ruchu wyprostu (zgięcia grzbietowego) w stawie skokowo-goleniowym.
- Odczytać kąt wyprostu na urządzeniu.
- Zatwierdzić pomiar, naciskając przycisk POMIAR.

3. Pomiar kąta zgięcia podszwowego

- Utrzymać ortometr w tej samej pozycji.
- Polecieć pacjentowi powrót do pozycji pośredniej (90° względem podłoża).
- Wyzerować urządzenie ponownie.
- Polecieć pacjentowi wykonanie ruchu zgięcia podszwowego w stawie skokowo-goleniowym.
- Odczytać wartość kąta i zatwierdzić pomiar, naciskając przycisk POMIAR.

Dokładna analiza zakresu ruchomości w stawie skokowo-goleniowym pozwala na ocenę funkcjonalności kończyn dolnych oraz wykrycie potencjalnych ograniczeń biomechanicznych.

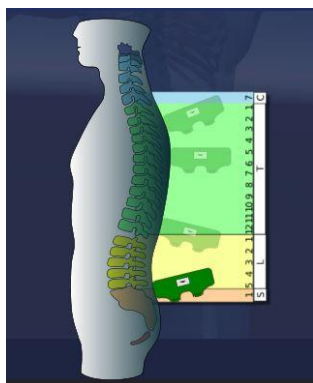
5.4.3 Scenariusz postępowania podczas oceny krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa w płaszczyźnie strzałkowej

Ocena krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa, w tym lordozy lędźwiowej oraz kifozy piersiowej, jest kluczowym elementem w diagnozowaniu zaburzeń posturalnych, takich jak skolioza, hiperlordoza, hipokifoza czy inne patologie, które mogą prowadzić do problemów zdrowotnych, w tym bólów pleców.

Scenariusz postępowania podczas oceny postawy obejmuje precyzyjne kroki przygotowania urządzenia ortometr, ustawienia pacjenta oraz wykonania pomiarów na różnych poziomach kręgosłupa. Działania te są realizowane za pomocą zaawansowanego sprzętu, który umożliwia dokładne zmierzenie kątów krzywizn, co jest niezbędne do dalszej analizy postawy ciała i podejmowania odpowiednich działań terapeutycznych. W rozdziale tym przedstawiono krok po kroku cały proces oceny, począwszy od uruchomienia urządzenia, przez pomiar nachylenia miednicy, lordozy lędźwiowej oraz kifozy piersiowej, aż po obliczenie łącznej wartości kifozy piersiowej.

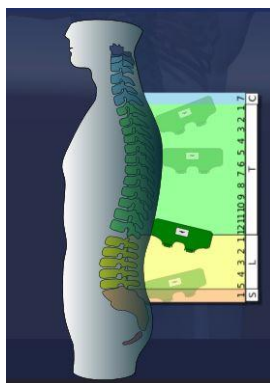
Scenariusz postępowania podczas oceny postawy w płaszczyźnie strzałkowej

1. Uruchomienie urządzenia ortometr i przygotowanie do badania:
 - Naciśnij przycisk WŁĄCZ na urządzeniu.
 - Ustaw badanego w pozycji swobodnej, niewymuszonej, lewym bokiem do siebie, z równo ustawionymi stopami oraz odsłoniętą górną częścią miednicy.
2. Ocena nachylenia miednicy:
 - Przyłóż ortometr powierzchnią A na kość krzyżową.
 - Zmierz nachylenie miednicy i odczytaj kąt NM.
 - Zatwierdź pomiar, naciskając przycisk POMIAR.



Rys. 95. Ocena nachylenia miednicy z wykorzystaniem ortometru.

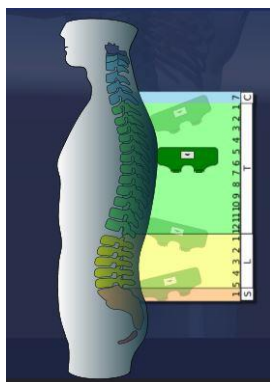
3. Ocena kąta lordozy lędźwiowej:
 - Wyzeruj ortometr.
 - Przyłóż ortometr powierzchnią A na przejście lędźwiowo-piersiowe w miejscu L1 - Th12.
 - Zmierz wartość lordozy lędźwiowej i odczytaj kąt LL.
 - Zatwierdź pomiar, naciskając przycisk POMIAR.



Rys. 96. Widok w aplikacji przyłożenia ortometru do pleców badanego podczas oceny a kąta lordozy lędźwiowej.

4. Ocena kąta kifozy piersiowej wstępującej:

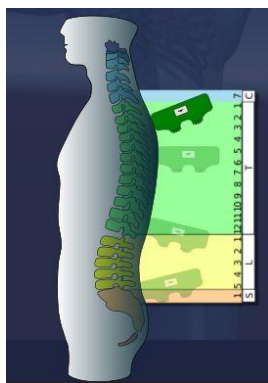
- Nie odwracając ortometru od pleców badanego, wyzeruj go.
- Przyłóż ortometr powierzchnią A na część szczytową kifozy piersiowej.
- Zmierz wartość kifozy piersiowej wstępującej i odczytaj kąt KW.
- Zatwierdź pomiar, naciskając przycisk POMIAR.
- Wyzeruj ortometr ponownie.



Rys. 97. Widok w aplikacji przyłożenia ortometru do pleców badanego podczas oceny kąta kifozy piersiowej wstępującej.

5. Ocena kąta kifozy piersiowej zstępującej:

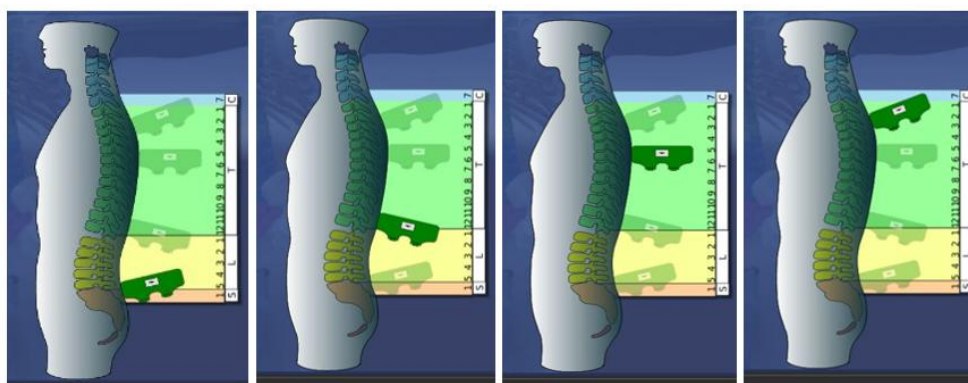
- Przyłóż ortometr pionowo powierzchnią A na część zstępującą kifozy piersiowej w okolicy między Th1 a Th3.
- Zmierz wartość kifozy piersiowej zstępującej i odczytaj kąt KZ.
- Zatwierdź pomiar, naciskając przycisk POMIAR.



Rys. 98. Widok w aplikacji przyłożenia ortometru do pleców badanego podczas oceny kąta kifozy piersiowej zstępującej.

6. Ocena kąta kifozy piersiowej:

- Kifoza piersiowa (KP) jest sumą kifozy wstępującej i kifozy zstępującej, która jest wyliczana w aplikacji i wyświetlana na ekranie monitora.



Rys. 99. Wizualizacja scenariusza pomiaru krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa z wykorzystaniem ortometru. Przedstawiono kolejne etapy oceny postawy w płaszczyźnie strzałkowej, obejmujące pomiar nachylenia miednicy, lordozy lędźwiowej oraz kifozy piersiowej (wstępującej i zstępującej).

5.5 Badania wykonane w ośrodku rehabilitacji

Badania systemu wykonano w Ośrodku Rehabilitacji „Troniny”. Dane pomiarowe zostały zebrane z wykorzystaniem przygotowanego stanowiska badawczego składającego się z komputera PC wyposażonego w system Windows, interfejs do komunikacji w standardzie Bluetooth 4.0. Do pomiaru krzywizn przednio-tylnych tułowia pacjenta wykorzystany został ortometr.

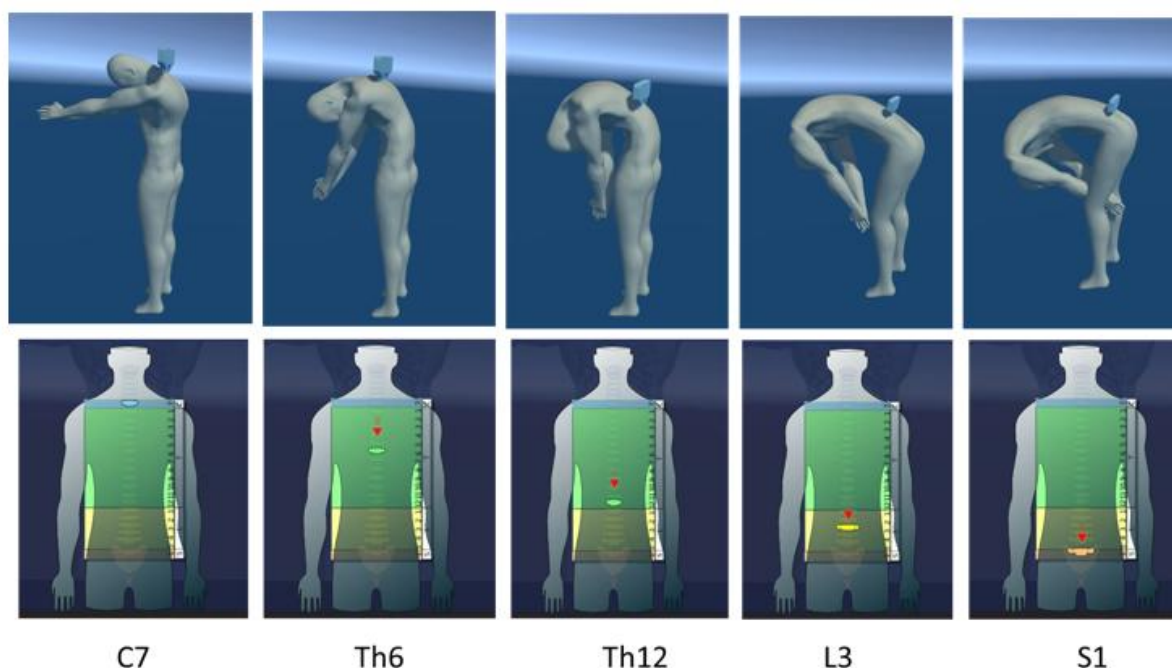
Prowadzący badanie specjalista medycyny z wieloletnim stażem posiadał zgodę komisji bioetycznej na prowadzenie badań z pacjentami. Zgodę wydała we wrześniu 2021 Komisja ds. Etyki Badań Naukowych Uniwersytetu Humanistyczno-Przyrodniczego w Częstochowie.

W trakcie badań oprogramowanie stanowiska badawczego, główna aplikacja oraz biblioteki programowe w tym komunikacyjne były modyfikowane i przystosowywane do przeprowadzenia konkretnych eksperymentów. Efektem badań jest baza danych obejmująca wyniki pomiarowe

zebrane w ramach istniejącego scenariusza oraz plik surowych danych pomiarowych. Surowe dane pomiarowe pozwalają m.in. na określenie stopnia wiarygodności pomiarów poprzez ocenę np. stabilności pozycji ortometru, ewentualne błędy transmisyjne itp. Struktura danych zebranych z ortometru opisana została wcześniej w Listing 9 w rozdziale 3.7.1

Podczas badań prowadzono pomiary krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa w płaszczyźnie strzałkowej – kąta nachylenia miednicy, kąta lordozy lędźwiowej, kąta kifozy piersiowej. Metoda ta pozwala na określenie krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa w oparciu o pomiar w określonych punktach w celu wyznaczenia kątów nachylenia miednicy, lordozy lędźwiowej, kifozy piersiowej wstępującej i zstępującej.

W płaszczyźnie czołowej badanie składa się z dwóch etapów pomiaru długości placów celem oceny elastyczności kręgosłupa oraz właściwego testu Adamsa do oceny kąta rotacji tułowia.



Rys. 100. Wizualizacja etapów pomiarów podczas testu Adamsa

W tym scenariuszu w efekcie tych badań rozszerzono procedury badawcze o etap, który polega na ciągłym pomiarze powierzchni kręgosłupa polegający na przesuwaniu rolki ortometru po kręgosłupie w pozycji pochylnej. W teście Adamsa w pozycji pochylnej podczas badania mierzony jest ciągły pomiar kąt rotacji tułowia ATR przesuwając ortometr tak by kręgosłup znajdował się pomiędzy jego rolkami.

5.6 Ilościowa analiza zebranych danych z ortometru

Podczas badań zebrano pliki surowych danych z ortometru w ilości 152591 ramek (linii), co odpowiadało sumarycznemu czasowi pracy ortometru wynoszącemu 508 minut. Podczas badań spadek napięcia w akumulatorze ortometru wyniósł 815mV.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
		odstep:	header	status	signal	battery	shake	roll	roll_offset	tilt	way	space	force1	force2	counter	crc	Przrost licznika:
114	09:56:42,422	00:00:00,151	426	0	-47,3	9,69982	0,025765	-46,2961	180	-89,6158	0	0	0,045727	0,04955	694	5434	1
115	09:56:42,675	00:00:00,253	426	0	-47,3	9,69982	0,026741	-44,752	180	-89,5874	0	0	0,045727	0,04955	695	33122	1 Po
116	09:56:42,828	00:00:00,153	426	0	-47,3	9,69982	0,02668	-45,7708	180	-89,6086	0	0	0,045727	0,04955	696	57387	1 Lic
117	09:56:43,031	00:00:00,203	426	0	-47,3	9,69982	0,026497	-51,2848	180	-89,6406	0	0	0,045727	0,04955	697	4468	1
118	09:56:43,283	00:00:00,252	426	0	-47,3	9,69982	0,026131	-48,9183	180	-89,637	0	0	0,04955	0,053375	698	42543	1
119	09:56:43,434	00:00:00,151	426	0	-47,3	9,69982	0,024057	-50,9645	180	-89,6799	0	0	0,045727	0,053375	699	59899	1 Lic
120	09:56:43,637	00:00:00,203	426	0	-47,3	9,69982	0,027839	-50,0425	180	-89,6692	0	0	0,04955	0,053375	700	48942	1
121	09:56:43,891	00:00:00,254	426	0	-46,3	9,69982	0,027229	-49,6669	180	-89,6798	0	0	0,04955	0,053375	701	54238	1
122	09:56:44,044	00:00:00,153	426	0	-46,3	9,69982	0,024545	-47,224	180	-89,6476	0	0	0,04955	0,053375	702	5224	1 Lic
123	09:56:44,246	00:00:00,202	426	0	-46,3	9,69982	0,020153	-48,2397	180	-89,6444	0	0	0,053375	0,057201	703	37251	1
124	09:56:44,448	00:00:00,202	426	0	-46,3	9,69982	0,024301	-47,5792	180	-89,6233	0	0	0,045727	0,053375	704	2146	1
125	09:56:44,651	00:00:00,203	426	0	-46,3	9,69982	0,027717	-47,6264	180	-89,6303	0	0	0,04955	0,053375	705	26829	1 Lic
126	09:56:44,904	00:00:00,253	426	0	-47,3	9,69982	0,026375	-50,9571	180	-89,634	0	0	0,045727	0,053375	706	49857	1
127	09:56:45,056	00:00:00,152	426	0	-47,3	9,69982	0,021617	-50,856	180	-89,627	0	0	0,041906	0,057201	707	4871	1
128	09:56:45,259	00:00:00,203	426	0	-47,3	9,69982	0,02729	-48,0394	180	-89,6196	0	0	0,045727	0,053375	708	29580	1 Lic
129	09:56:45,511	00:00:00,252	426	0	-47,3	9,69982	0,02424	-48,0373	180	-89,5878	0	0	0,041906	0,053375	709	15899	1
130	09:56:45,663	00:00:00,152	426	0	-47,3	9,69982	0,026497	-49,5943	180	-89,6335	0	0	0,045727	0,053375	710	43124	1
131	09:56:45,865	00:00:00,202	426	0	-47,3	9,69982	0,024301	-48,5936	180	-89,6548	0	0	0,045727	0,053375	711	1715	1
132	09:56:46,068	00:00:00,203	426	0	-48,3	9,69982	0,024667	-48,2705	180	-89,6479	0	0	0,04955	0,053375	712	37441	1 ile
133	09:56:46,271	00:00:00,203	426	0	-47,3	9,69982	0,023569	-52,7119	180	-89,7051	0	0	0,045727	0,04955	713	42060	1
134	09:56:46,474	00:00:00,203	426	0	-47,3	9,69982	0,02668	-49,226	180	-89,6659	0	0	0,041906	0,053375	714	4686	1 ile
135	09:56:46,727	00:00:00,253	426	0	-48,3	9,74614	0,024911	-48,6285	180	-89,6589	0	0	0,041906	0,053375	715	36452	1
136	09:56:47,130	00:00:00,403	426	512	-48,3	9,74614	0,02668	-55,2614	180	-89,6623	0	0	0,045727	0,04955	717	15242	2 ile
137	09:56:47,282	00:00:00,152	426	0	-48,3	9,74614	0,029303	-59,2039	180	-89,6799	0	0	0,04955	0,04955	718	45784	2 ile

Rys. 101. Ramki z ortometru zebrane podczas badań wprowadzone do arkusza kalkulacyjnego

Na podstawie zebranych danych dokonano analizy siły sygnału BLE wskazywanej przez urządzenie podczas pracy. Wyznaczono następujące parametry siły sygnału:

Max [dBm]:	-4,00
Min [dBm]:	-87,00
Średnia [dBm]:	-64,82
Odchylenie standardowe [dBm]:	6,34
Mediana [dBm]:	-66,00

Zarówno średnia, jak i mediana oraz odchylenie standardowe zarejestrowanych pomiarów siły sygnału BLE wskazują, że badania odbywały się w warunkach umiarkowanie dobrych, w obrębie jednego pomieszczenia. Rozkład wartości nie jest silnie zaburzony. Odchylenie standardowe 6,34 dB oznacza typowa zmienność dla BLE w realnym środowisku, chwilowe wahania o kilka–kilkanaście dB są normalne, podczas pracy w takich warunkach. Zarejestrowana minimalna siła sygnału i wartości zbliżone do niej to były pojedyncze spadki, jednakże mogą powodować niestabilność (gubienie pakietów, opóźnienia, zrywanie połączenia) [182].

Wyznaczono odstępy czasowe między odebranymi ramkami, które charakteryzowały się następującymi wskaźnikami:

Max [s]:	10,483
Min [s]:	0,001
Średni [s]:	0,212
Odchylenie standardowe [s]:	0,072
Mediana [s]	0,205

Ponieważ ortometr wysyła ramki BLE co 200ms powyższe stwierdzone statystyki odebranych pakietów świadczą, że typowy odstęp jest bardzo bliski oczekiwanemu 0,200s, natomiast wystąpiły rzadkie, skrajne zdarzenia (bardzo krótkie i bardzo długie przerwy). Najdłuższy odstęp powiązany był z wystąpieniem najsłabszej siły sygnału i spowodował utratę pakietów. Zachowanie systemu daje odstępy w okolicach 0,205–0,212s, co wynika z opóźnień warstwy radiowej.

Powyższe konkluzje potwierdza analiza wbudowanego w ortometr licznika transmitowanych ramek. Wyznaczono różnice pomiędzy wartościami licznika kolejnych po sobie ramek, które charakteryzują się:

Max różnica :	85
Min różnica:	1
Średnia różnica:	1,052
Odchylenie standardowe:	0,359
Mediana:	1
Ile razy różnica >1	7444 (4,87%)
Ile razy różnica >2	178 (0,12%)
Ile razy różnica >3	36 (0,02%)

Te statystyki różnic licznika ramek wskazują, że w przeważającej większości przypadków kolejne ramki transmitowane były bez strat, ale wystąpiły rzadkie epizody utraty ramek pomiarowych. Epizody te miały miejsce w momencie wystąpienia najsłabszej siły sygnału. Utratę większej liczby ramek niż dwie stwierdzono 178 razy co stanowi 0,12% liczby przesłanych ramek.

Zestawienie ilościowe liczby niektórych stanów urządzenia sygnalizowanych przez urządzenie podczas transmisji:

Liczba <i>batt_low</i> :	0
Liczba <i>ble_conn_err</i> :	9253 (6,06%)
Liczba <i>acc_err</i> :	0
Liczba <i>way_err</i> :	1574 (1,03%)

Urządzenie podczas badań ani razu nie zasygnalizowało stanu niskiego naładowania akumulatora (*batt_low*), co zważywszy na sumaryczny czas działania urządzenia wynoszący około 8,5h, świadczy o dobrze dobranych parametrach zasilania i niskim poborze mocy

urządzenia. Nie stwierdzono również błędów sprzętowych układu akcelerometru (*acc_err*). Urządzenie podczas badań sygnalizowało możliwość utraty ramek w sytuacji pogorszenia jakości połączenia bezprzewodowego (*ble_conn_err*). Liczba takich stanów (9253) jest większa niż liczba sytuacji, w których nastąpiła rzeczywista utrata danych wynikająca z licznika odebranych ramek (7444). Wynika to z tego, że urządzenie ten stan sygnalizuje przez czas dłuższy niż okres transmisji jednej ramki.

Powyższe wyniki wskazują, że urządzenie dobrze spełniało swoją funkcję podczas pomiarów a sporadyczna utrata ramek pomiarowych jest sygnalizowana przez urządzenie.

5.7 Wyniki badań na zbiorze osób badanych

Zestaw danych wejściowych obejmował pomiary kąta rotacji tułowia i długości kręgosłupa w pozycji stojącej (jeden przebieg) oraz w pozycji pochylonej (dwa przebiegi) dla każdego badanego. Odrzucono przebiegi badań błędnie wykonane, które nie zawierały pomiarów we wszystkich punktach charakterystycznych. Odfiltrowany zbiór danych zawierał pomiary wykonane:

- w pozycji stojącej - 33 przebiegi pomiarowe ortometru (faza stojąca),
- w pozycji pochylonej - 28 przebiegi pomiarowe ortometru (przebieg pierwszy – faza Adamsa 1) oraz 30 przebiegów powtórzonych (faza Adamsa 2) – w sumie 58 przebiegów.

5.7.1 Wyznaczenie zakresów pomiarowych dla ortometru

Zestaw danych wejściowych posłużył do określenia średniej prędkości liniowej V_{sr} z jaką poruszał się ortometr podczas poszczególnych faz badań wykonywanych przez specjalistę. Dane wejściowe wykorzystane do obliczeń V_{sr} załączono w sekcji z załącznikami w tabeli Tabela 100. V_{sr} dla pojedynczej fazy wyznaczono dwoma metodami:

- jako średnią arytmetyczną prędkości chwilowych obliczanych w odstępach 200ms, równych okresowi transmisji pojedynczej ramki z urządzenia do aplikacji,

	Faza Stojąca	Faza Adamsa 1	Faza Adamsa 2	Wszystkie fazy
V_{sr} [mm/s]	28,41	27,70	25,67	27,30
Odchylenie std V_{sr} [mm/s]	10,14	10,36	7,63	9,45
Max V_{sr} [mm/s]	55,75	58,84	42,16	58,84
Min V_{sr} [mm/s]	14,04	10,61	14,89	10,61

Tabela 78. Użytkowa prędkość liniowa ortometru - średnia arytmetyczna prędkości chwilowych

- jako stosunek długości odcinka kręgosłupa C7-S1 do czasu trwania pomiaru tego odcinka ortometrem.

	Faza Stożąca	Faza Adamsa 1	Faza Adamsa 2	Wszystkie fazy
V_{sr} [mm/s]	28,00	27,23	25,28	26,88
Odchylenie std V_{sr} [mm/s]	9,78	10,21	7,49	9,23
Max V_{sr} [mm/s]	53,66	58,01	41,23	58,01
Min V_{sr} [mm/s]	13,61	11,03	14,58	11,03

Tabela 79. Użytkowa prędkość liniowa ortometru - długość odcinka do czasu trwania pomiaru

V_{sr} wyznaczona pierwszą metodą (Tabela 78) ogółem we wszystkich fazach wyniosła 27,30 mm/s – średnie w poszczególnych fazach badania wyniosły odpowiednio 28,41, 27,70 oraz 25,67 mm/s. V_{sr} wyznaczona drugą metodą (Tabela 79) ogółem we wszystkich fazach wyniosła 26,88 mm/s – średnie w poszczególnych fazach badania wyniosły odpowiednio 28,00, 27,23, 25,28 mm/s.

Wyznaczono także średnią wartość bezwzględną prędkości kątowej $|\omega|_{\text{sr}}$ (bez uwzględniania kierunków obrotu) dla poszczególnych faz badania, w których mierzony był kąt rotacji tułowia w pozycji pochylonej podczas badania pacjenta. Dane wejściowe wykorzystane do obliczeń $|\omega|_{\text{sr}}$ załączono w sekcji z załącznikami w tabeli Tabela 101. Średnie prędkości kątowe ortometru podczas badań w ośrodku rehabilitacji wyniosły:

	Faza Adamsa 1	Faza Adamsa 2	Wszystkie fazy
$ \omega _{\text{sr}}$ [°/s]	2,13	1,73	1,93
Odchylenie std $ \omega _{\text{sr}}$ [°/s]	1,40	0,92	1,19
Min $ \omega _{\text{sr}}$ [°/s]	0,94	0,77	0,77
Max $ \omega _{\text{sr}}$ [°/s]	5,94	3,92	5,94

Tabela 80. Średnia prędkość kątowa podczas faz pomiaru ortometrem kąta rotacji tułowia

Dodatkowo wyznaczono średnie zakresy prędkości kątowych (min-max) jakie zostały odnotowane podczas tych badań.

	Faza Adamsa 1		Faza Adamsa 2		Wszystkie fazy	
	$ \omega _{\text{min}}$	$ \omega _{\text{max}}$	$ \omega _{\text{min}}$	$ \omega _{\text{max}}$	$ \omega _{\text{min}}$	$ \omega _{\text{max}}$
$ \omega _{\text{sr}}$ [°/s]	0,03	9,87	0,04	7,75	0,04	8,81
Odchylenie std $ \omega _{\text{sr}}$ [°/s]	0,04	8,23	0,06	4,63	0,05	6,70
Min $ \omega _{\text{sr}}$ [°/s]	0,00	3,46	0,00	3,25	0,00	3,25
Max $ \omega _{\text{sr}}$ [°/s]	0,16	35,04	0,26	20,48	0,26	35,04

Tabela 81. Średnie zakresy prędkości kątowych podczas faz pomiaru ortometrem kąta rotacji tułowia

Badania przeprowadzone na stanowisku pomiarowym kąta opisane w rozdziale kąta oraz wyznaczone modele obejmowały zakres prędkości kątowych od do. Podczas przeprowadzonych badań w ośrodku maksymalna prędkość kątowa wyniosła ok 35 °/s, która mieści w zakresie badań przeprowadzonych na stanowisku pomiarowym. Jak można było zauważyć w przeprowadzonych badaniach im mniejsza prędkość kątowa tym dokładniejsza były estymacja pomiarów.

Wyznaczone prędkości średnie posłużyły do sformułowania zalecenia, że liniowa prędkość użytkowa urządzenia dla pomiarów w fazie w pozycji stojącej i pochylonej powinna wynosić 25mm/s. Dodatkowo wyznaczone prędkości liniowe pozwalają na stosowanie estymacji z mniejszym błędem dla prędkości liniowej do 25mm/s. Mniejsza prędkość liniowa przekłada się na mniejsze prędkości kątowe i zwiększenie jakości pomiaru kąta. Zastosowanie zalecanego zakresu prędkości liniowej do 25mm/s pozwala na zwiększenie jakości pomiarów z ortometru o 11% co zostało wykazane w rozdziale 3.9.3.

5.7.2 Zastosowanie metody wyznaczania położenia punktów charakterystycznych

Ze zbioru badań pacjentów wyznaczono średnią, minimum, max, odchylenie standardowe procentowego położenia wzorcowych punktów charakterystycznych w T6, T12 i L3 metodą opisaną w rozdziale 4.3. Dane wejściowe wykorzystane do obliczeń załączono w sekcji z załącznikami w tabeli Tabela 102.

Poniżej przedstawiono średnie procentowe położenie punktów charakterystycznych na osi kręgosłupa obejmującej odcinek od kręgu C7 do S1, dla odfiltrowanego zbioru danych wejściowych, przy założeniu położenia C7 – 0%, S1 – 100%.

	Faza Stojąca	Faza Adamsa 1	Faza Adamsa 2	Fazy Adamsa (1 i 2)
T6	40,08%	34,97%	35,37%	35,18%
T12	61,17%	57,53%	56,50%	57,00%
L3	81,65%	78,52%	78,07%	78,29%

Tabela 82. Średnie położenie punktów charakterystycznych odpowiadających kręgom T6, T12 i L3 w poszczególnych fazach.

	Faza Stojąca	Faza Adamsa 1	Faza Adamsa 2	Fazy Adamsa (1 i 2)
T6	5,22%	4,60%	4,07%	4,30%
T12	4,06%	3,95%	4,12%	4,04%
L3	4,55%	4,20%	3,98%	4,06%

Tabela 83. Odchylenie standardowe średniego procentowego położenia punktów charakterystycznych odpowiadającym kręgom T6, T12 i L3 w poszczególnych fazach.

	Faza Stojąca		Faza Adamsa 1		Faza Adamsa 2		Fazy Adamsa (1 i 2)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
T6	25,76%	49,28%	27,27%	50,00%	27,23%	44,63%	27,23%	50,00%
T12	47,47%	66,67%	48,80%	67,39%	46,53%	66,86%	46,53%	67,39%
L3	67,17%	88,24%	68,90%	90,67%	67,33%	85,31%	67,33%	90,67%

Tabela 84. Wartości minimalne i maksymalne położenia punktów charakterystycznych odpowiadającym kręgom T6, T12 i L3 w poszczególnych fazach.

Wyniki zweryfikowano estymując punkty charakterystyczne dla zbioru zbadanych pacjentów przyjmując położenie punktów charakterystycznych równe wartościom średnim z tabeli Tabela 82 z fazy stojącej oraz zbiorcze dla faz Adamsa 1 i 2. Wartości błędu MAE [mm], jego odchylenie standardowe oraz wartości minimalne i maksymalne dla estymowanych punktów charakterystycznych w poszczególnych fazach oraz ogółem podano w poniższej tabeli.

		Faza Stojąca	Fazy Adamsa (1 i 2)	Ogółem
MAE [mm]	T6	15,38	15,13	15,22
	T12	11,59	12,77	12,34
	L3	13,71	13,92	13,85
	Ogółem	13,56	13,94	13,80
Std MAE [mm]	T6	12,58	10,27	11,09
	T12	11,25	11,77	11,53
	L3	12,26	10,38	11,03
	Ogółem	12,02	10,81	11,24
Min MAE [mm]	T6	0,20	0,27	0,20
	T12	0,01	0,26	0,01
	L3	0,05	0,14	0,05
	Ogółem	0,01	0,14	0,01
Max MAE [mm]	T6	56,73	44,46	56,73
	T12	54,25	42,26	54,25
	L3	57,33	44,28	57,33
	Ogółem	57,33	44,46	57,33

Tabela 85. Statystyka błędów MAE dla estymowanych wartości położenia punktów charakterystycznych

Analogicznie wyznaczono średni błąd względny, jego wartości prezentuje poniższa tabela:

		Faza Stojąca	Fazy Adamsa (1 i 2)	Ogółem
Średni błąd względny δ	T6	10,94%	9,65%	10,12%
	T12	5,12%	5,12%	5,12%
	L3	4,30%	4,04%	4,13%
	Ogółem	6,79%	6,27%	6,46%
Std δ	T6	11,39%	7,18%	8,89%
	T12	5,50%	5,02%	5,17%
	L3	4,09%	3,34%	3,61%
	Ogółem	8,15%	5,91%	6,80%
Min δ	T6	0,21%	0,21%	0,21%
	T12	0,00%	0,11%	0,00%
	L3	0,02%	0,03%	0,02%
	Ogółem	0,00%	0,03%	0,00%
Max δ	T6	55,62%	29,64%	55,62%
	T12	28,85%	22,48%	28,85%
	L3	21,55%	16,28%	21,55%
	Ogółem	55,62%	29,64%	55,62%

Tabela 86. Statystyka średnich błędów względnych dla estymowanych wartości położenia punktów charakterystycznych

Metoda została zaimplementowana. Dokładność metody w oparciu o MAE wynosi w kręgach T6 15,22mm (10,12%), T12 12,34mm (5,12%), L3 13,85mm (4,13%) - średnio 13,80mm (6,46%).

Aby uzyskać dokładniejsze wyniki estymacji wyznaczania punktów charakterystycznych wymagana jest większa liczba pomiarów niż obecna wynosząca 91 w obu pozycjach. Większa liczba pomiarów pozwoli również na zastosowanie innych metod numerycznych, w tym uczenia maszynowego. Dodatkowo możliwe będzie dokonanie podziału zbioru na grupy pacjentów pod względem płci, przedziału wiekowego i wzrostu.

5.7.3 Wyznaczenie grup ryzyka IS z wykorzystaniem mechanizmów drzew decyzyjnych

Wyznaczono grupy ryzyka wystąpienia skoliozy idiopatycznej wraz z oceną postawy na bazie krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa z wykorzystaniem metody drzew decyzyjnych. Poniżej wyniki dla zbioru badań pacjentów w pozycji pochylonej.

Pacjent	ABS(NM) [°]	ABS(LL) [°]	ABS(KP) [°]	ATR [°]	HumpSum [°]	Grupa ryzyka IS	Krzywizny przednio- tylne	Ocena NM	Ocena LL	Ocena KP
1	25,54	44,06	39,30	2,59	5,02	Grupa Ryzyka I IS	Prawidłowe	W normie	W normie	W normie
3	15,77	28,43	30,74	2,66	4,99	Grupa Ryzyka I IS	Prawidłowe	W normie	W normie	W normie
4	24,24	36,73	30,14	3,41	6,54	Grupa Ryzyka III IS	Prawidłowe	W normie	W normie	W normie
10	23,02	36,30	33,82	3,45	5,88	Grupa Ryzyka I IS	Prawidłowe	W normie	W normie	W normie
13	19,64	33,68	31,74	5,82	7,72	Grupa Ryzyka III IS	Prawidłowe	W normie	W normie	W normie
14	24,01	39,55	36,78	6,00	10,94	Grupa Ryzyka IV IS	Prawidłowe	W normie	W normie	W normie
15	20,62	32,14	27,29	3,37	5,62	Grupa Ryzyka I IS	Prawidłowe	W normie	W normie	W normie
16	13,73	27,16	34,62	4,58	8,15	Grupa Ryzyka IV IS	Prawidłowe	W normie	W normie	W normie
17	24,16	36,32	25,26	3,51	5,76	Grupa Ryzyka I IS	Prawidłowe	W normie	W normie	W normie
18	24,84	37,00	27,98	2,04	3,25	Postawa prawidłowa	Prawidłowe	W normie	W normie	W normie
20	17,92	27,09	23,50	5,10	6,83	Grupa Ryzyka III IS	Prawidłowe	W normie	W normie	W normie
21	19,99	40,13	36,50	3,50	6,57	Grupa Ryzyka III IS	Prawidłowe	W normie	W normie	W normie
22	15,01	18,34	10,65	16,34	23,77	Grupa Ryzyka IV IS	Płecy płaskie	W normie	Niska	Niska
25	22,28	31,40	29,97	7,87	12,83	Grupa Ryzyka IV IS	Prawidłowe	W normie	W normie	W normie
27	25,49	32,95	26,89	2,37	4,43	Grupa Ryzyka I IS	Prawidłowe	W normie	W normie	W normie
28	15,41	32,15	34,10	4,16	6,19	Grupa Ryzyka III IS	Prawidłowe	W normie	W normie	W normie
29	16,31	32,73	34,67	7,98	14,89	Grupa Ryzyka IV IS	Prawidłowe	W normie	W normie	W normie
30	24,66	32,84	28,36	3,84	6,52	Grupa Ryzyka III IS	Prawidłowe	W normie	W normie	W normie
34	33,93	44,71	34,26	4,17	5,98	Grupa Ryzyka II IS	Brak decyzji	Wysoka	W normie	W normie
35	15,61	30,41	36,37	3,41	6,46	Grupa Ryzyka III IS	Prawidłowe	W normie	W normie	W normie
36	18,81	29,70	37,37	2,94	5,27	Grupa Ryzyka I IS	Prawidłowe	W normie	W normie	W normie
37	18,29	34,84	28,03	12,22	15,39	Grupa Ryzyka IV IS	Prawidłowe	W normie	W normie	W normie
38	28,13	35,79	22,21	5,94	8,17	Grupa Ryzyka IV IS	Prawidłowe	W normie	W normie	W normie
40	15,50	30,95	45,70	5,61	9,42	Grupa Ryzyka IV IS	Brak decyzji	W normie	W normie	Wysoka
43	19,81	26,24	25,98	4,71	8,74	Grupa Ryzyka IV IS	Prawidłowe	W normie	W normie	W normie
44	23,44	47,93	46,09	6,60	12,95	Grupa Ryzyka IV IS	Brak decyzji	W normie	Wysoka	Wysoka
52	11,45	20,98	19,75	5,51	9,47	Grupa Ryzyka IV IS	Brak decyzji	W normie	W normie	Niska
53	31,95	45,27	29,93	5,01	9,87	Grupa Ryzyka IV IS	Brak decyzji	Wysoka	Wysoka	W normie

Tabela 87. Wyniki działania drzewa decyzyjnego wyznaczającego grupy ryzyka wystąpienia skoliozy oraz oceny postawy

5.8 Wdrożenie

Warunkiem wdrożenia wyrobu na rynek jest dokonanie oceny zgodności. Aby ta ocena była możliwa konieczne było opracowanie dokumentacji, która stanowi potwierdzenie skuteczności i bezpieczeństwa działania wyrobu. Poniżej przedstawiono wybrane dokumenty, które wchodzi w skład dokumentacji systemu ORT-100, na który składają się urządzenie Ortometr oraz aplikacja ORT.

Dokument	Opis
Instrukcja Używania	Instrukcja używania systemu ORT-100 została podzielona na trzy części. Pierwsza z nich to Instrukcja obsługi urządzenia Ortometr, zawierająca szczegółowe informacje na temat jego działania i użytkowania. Druga część to Instrukcja obsługi aplikacji ORT-100, która wyjaśnia sposób korzystania z oprogramowania wspierającego badania. Trzecia część to Instrukcja scenariuszy badań postawy, opisująca możliwe procedury diagnostyczne, które można przeprowadzić za pomocą systemu ORT-100.
Karta klasyfikacji wyrobu	Karta klasyfikacji wyrobu zawiera informacje dotyczące klasyfikacji wyrobu. Wyrób został zaklasyfikowany jako system diagnostyczny do oceny postawy ciała i pomiarów ortopedycznych. Klasyfikacja została przeprowadzona zgodnie z Rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2017/745 z dnia 5 kwietnia 2017 r. w sprawie wyrobów medycznych, uwzględniając zmiany w dyrektywie 2001/83/WE oraz rozporządzeniach (WE) nr 178/2002 i nr 1223/2009, a także uchylene dyrektyw Rady 90/385/EWG i 93/42/EWG. Wyrób spełnia regułę 11 i został sklasyfikowany jako klasa IIA.
Plan zarządzania ryzykiem	Plan ma na celu określenie potencjalnych zagrożeń związanych z produktem oraz opracowanie działań minimalizujących te zagrożenia. Głównym zadaniem planu jest weryfikacja poprawności konstrukcji produktu, a także zapewnienie, że wyrób spełnia wymagania dotyczące podstawowego bezpieczeństwa oraz zasadniczej funkcjonalności zgodnie z obowiązującymi normami.
Charakterystyka wyrobu	Dokument ma na celu dostarczenie szczegółowych informacji na temat wyrobu medycznego, które są niezbędne do jego wprowadzenia na rynek UE. Zawiera on dane dotyczące przeznaczenia, konstrukcji,

Dokument	Opis
	działania oraz wszelkich cech wyrobu medycznego, które są istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa i skuteczności.
Identyfikacja zagrożeń i Ocena ryzyka	Dokument zawiera identyfikację znanych i przewidywalnych zagrożeń związanych z wyrobem medycznym, uwzględniając zarówno przewidziane zastosowanie wyrobu, jak i racjonalnie przewidywalne niewłaściwe użycie. Podczas identyfikacji zagrożeń związanych z używaniem sytemu ORT-100 analizowane były właściwości związane z bezpieczeństwem, zarówno w stanie normalnym, jak i w przypadku uszkodzenia wyrobu. W ramach analizy uwzględniono zagrożenia związane z używaniem systemu ORT-100, powstające na skutek niewłaściwej obsługi oraz pojawiające się na styku człowiek-system ORT-100.
Sprawozdanie z zarządzania ryzykiem	Dokument stanowi podsumowanie przeprowadzonej analizy ryzyka dla systemu ORT-100. W sprawozdaniu zaznaczone zostało, że plan zarządzania ryzykiem został prawidłowo wdrożony, a całkowite ryzyko resztkowe jest akceptowalne. Ponadto, wdrożono odpowiednie metody w celu uzyskania niezbędnych informacji produkcyjnych i poprodukcyjnych.
Specyfikacja interfejsu użytkownika	Dokument zawiera zbiór charakterystyk, które kompleksowo i perspektywicznie opisują interfejs użytkownika urządzenia medycznego, jakim jest system ORT-100.
Plan rozwoju oprogramowania	Dokument ma na celu zorganizowanie i nadzorowanie działań związanych z procesem rozwoju oprogramowania aplikacji ORT-100. W ramach planu określono klasę oprogramowania dla aplikacji ORT-100, której przypisana została klasa bezpieczeństwa: A.
Wymagania dla oprogramowania	Dokument ten zawiera udokumentowaną architekturę, która opisuje strukturę oprogramowania dla aplikacji ORT-100. Architektura ta identyfikuje poszczególne elementy oprogramowania oraz dokumentuje interfejsy między nimi, jak również pomiędzy oprogramowaniem a innymi podzespołami, zarówno programowymi, jak i sprzętowymi.

Dokument	Opis
Moduły programowe – architektura	Dokument zawiera informacje o modułach realizujących podstawowe funkcje najniższego poziomu, zgodnie z normą 62304 określanych jako JEDNOSTKI PROGRAMOWE. Dodatkowo, w dokumencie opisano moduły realizujące złożone funkcje przy wykorzystaniu modułów podstawowych, które zgodnie z normą 62304 są klasyfikowane jako POZYCJE OPROGRAMOWANIA.
ORT-100 protokół komunikacji BluetoothLE	Dokument zawiera informacje na temat komunikacji urządzenia Ortometr z komputerem PC. Komunikacja ta jest możliwa za pomocą standardowego interfejsu radiowego Bluetooth Low Energy. Do realizacji komunikacji Ortometr z komputerem PC wykorzystano Nordic UART Service (NUS), który używa 128-bitowego UUID: 6E400001-B5A3-F393-E0A9-E50E24DCCA9E. Komunikacja odbywa się za pomocą dwóch charakterystyk: RX Characteristic (UUID: 6E400002-B5A3-F393-E0A9-E50E24DCCA9E) – służy do odbioru danych z wirtualnego UART’a. TX Characteristic (UUID: 6E400003-B5A3-F393-E0A9-E50E24DCCA9E) – umożliwia wysyłanie danych do wirtualnego UART’a.
Spis oprogramowania	Dokument zawiera informacje na temat środowiska wykorzystywanego do tworzenia oprogramowania. Aplikacja została wytworzona w środowisku Microsoft Visual Studio 2017 Pro, a jej kod napisano w języku C#. Do komunikacji z urządzeniem wykorzystywany jest moduł w formie biblioteki DLL, który został napisany w języku C++. Dokument opisuje również pliki źródłowe oprogramowania, proces budowania plików niezbędnych do tworzenia aplikacji, oraz wymagania sprzętowe potrzebne do prawidłowego funkcjonowania oprogramowania.
Lista kontrolna dokumentacji rozwoju oprogramowania	Opracowana lista stanowi dowód na zapewnienie kompletności dokumentacji rozwoju i/lub konserwacji oprogramowania oraz na spełnienie założeń dotyczących oprogramowania. W dokumencie tym wskazano dokumenty, które spełniają wymagania zgodnie z normą PN-EN 62304, w tym m.in. plan rozwoju oprogramowania (62304p5.1),

Dokument	Opis
	zarządzanie ryzykiem i analizę ryzyka (62304p5.2.4), czy też dokumentację architektury oprogramowania i interfejsów (62304p5.3.1; p5.3.2)
Lista kontrolna zgodności	Opracowana lista zawiera odniesienia do odpowiednich elementów dokumentacji technicznej, zastosowanych norm i innych kryteriów stanowiących dowody na spełnienie wymagań zasadniczych. Odwołania do dokumentacji technicznej dotyczą np. instrukcji używania, dokumentów związanych z weryfikacją i walidacją wyrobu, wyników i ocen testów czy procesu zarządzania ryzykiem.

Tabela 88 Wybrane dokumenty wymagane w ocenie zgodności wyrobu System ORT-100, w skład którego wchodzi urządzenie Ortometr oraz aplikacja ORT. W opisach pod pojęciem wyrób/produkt rozumiany jest system ORT-100.

System ORT-100 został zaprojektowany i opracowany zgodnie z najwyższymi standardami jakości oraz wymogami prawnymi stawianymi wyrobom medycznym. Spełnia on wszystkie niezbędne normy i regulacje, co umożliwia jego wdrożenie na rynku jako certyfikowany wyrób medyczny. Dzięki zastosowaniu zaawansowanych technologii oraz rygorystycznemu procesowi walidacji, ORT-100 zapewnia bezpieczeństwo, skuteczność oraz zgodność z wymaganiami klinicznymi, wspierając personel medyczny podczas badań przesiewowych wad postawy u dzieci i młodzieży.

5.9 Podsumowanie i wnioski

W rozdziale przedstawiono wyniki wdrożenia opracowanych wcześniej metod w systemie do automatycznej analizy asymetrii grzbietu i krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa.

Szczegółowo opisano założenia projektowe oraz wymagania normatywne dla systemu ORT, precyzujące proces projektowania oraz rozwoju oprogramowania.

Przedstawiono funkcje ortometru elektronicznego ORT-100, architekturę aplikacji użytkowej ORT oraz strukturę bazy danych do przechowywania danych diagnostycznych, pomiarowych oraz scenariuszy badań wraz z ich implementacją. Pokazano schemat architektury oprogramowania zawierający poszczególne moduły programowe.

Przeprowadzono badania wykrywania skolioz u dzieci i młodzieży wykonanych w ośrodku rehabilitacji przez specjalistę z dziedziny medycyny z wykorzystaniem opracowanego systemu. Zaprezentowano analizę ilościową zebranych danych pomiarowych.

Na podstawie wyników badań dokonano oceny skuteczności metody automatycznego wyznaczania punktów charakterystycznych do analizy asymetrii grzbietu oraz krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa oraz wyznaczono grupy ryzyka wystąpienia skoliozy idiopatycznej.

Przeprowadzone wdrożenie zostało potwierdzone przez eksperta w dziedzinie. Weryfikacja została wykonana na grupie pacjentów i potwierdziła, że opracowany system stanowi użyteczne **narzędzie do wczesnego wykrywania skolioz u dzieci i młodzieży**.

Zaprezentowane rozwiązanie zostało nagrodzone przez Polską Izbę Rzeczników Patentowych w XIV edycji Konkursu Innowator Śląska (załącznik Zał. 1), a także przez Naczelną Izbę Lekarską w Konkursie Przychodnia Przyszłości w kategorii „Wdrożenie technologii lub wyrobu medycznego” (załącznik Zał. 2).

Realizacja powyższych celów pokazuje, że **metoda automatycznej analizy asymetrii grzbietu oraz krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa stanowi użyteczne narzędzie do wczesnego wykrywania skolioz u dzieci i młodzieży**, co udowadnia III hipotezę rozprawy.

6 KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

W oparciu o dotychczasowe wyniki badań oraz wdrożone rozwiązania planowane są dalsze prace badawcze, których celem jest udoskonalenie metod diagnostyki wad postawy oraz ich skuteczniejsza integracja z systemami informatycznymi wykorzystywanymi w ochronie zdrowia.

W planach jest przeprowadzenie wspólnych badań nad rozwojem kompleksowego programu profilaktyki i leczenia wad postawy dzieci i młodzieży z wykorzystaniem ortometru oraz systemu do badań przesiewowych z zastosowanymi rozwiązaniami będącymi efektem projektu doktorskiego. Przeprowadzone wieloośrodkowe badania pozwolą na zwiększenie bazy danych pomiarów z ortometru. Większa liczba badań pozwoli na zastosowanie przedstawionych metod oraz wypracowanie nowych wykorzystujących uczenie maszynowe.

Wśród ośrodków wytypowanych do badań znajdują się: Uniwersytet Humanistyczno-Przyrodniczy im Jana Długosza w Częstochowie, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Uniwersytet im. Pavla Józefa Safarika w Koszycach, PHU Technomex w Gliwicach, Ośrodek Rehabilitacji Leczniczej w Kłobucku oraz Sieć Badawcza Łukasiewicz - Krakowski Instytut Technologiczny – Centrum Inżynierii Biomedycznej.

Główne obszary dalszych badań będą koncentrować się na rozwinięciu funkcjonalności systemu diagnostycznego poprzez integrację z elektroniczną dokumentacją medyczną (EDM) oraz zastosowanie sztucznej inteligencji do automatycznej analizy danych pomiarowych.

Integracja elektronicznej dokumentacji medycznej (EDM) z systemem diagnostyki wad postawy

Jednym z kluczowych celów dalszych badań będzie opracowanie modułu EDM umożliwiającego automatyczne gromadzenie, przetwarzanie oraz analizę danych pomiarowych uzyskanych podczas badań przesiewowych i diagnostycznych. Integracja systemu diagnostycznego z EDM pozwoli na:

- archiwizację wyników badań i ich łatwe udostępnianie specjalistom,
- automatyczne generowanie raportów diagnostycznych,
- śledzenie postępów leczenia pacjentów na podstawie danych historycznych,
- integrację z systemami informatycznymi placówek medycznych oraz systemami e-Zdrowia.

Dodatkowym wyzwaniem badawczym będzie zapewnienie zgodności modułu EDM ze standardami interoperacyjności, takimi jak HL7 oraz FHIR, co umożliwi efektywną wymianę danych między różnymi systemami opieki zdrowotnej.

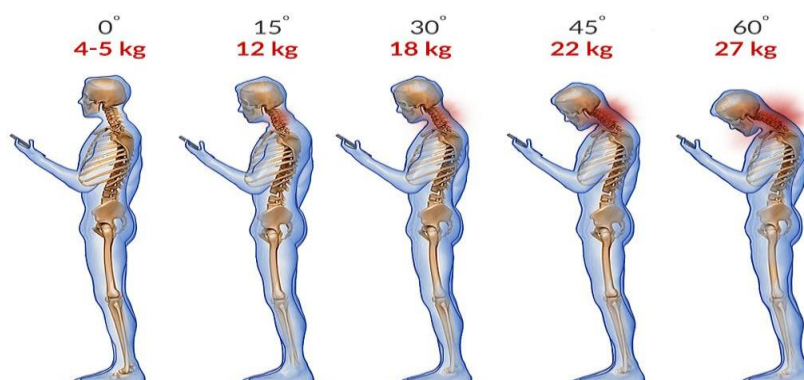
Rozwój metod sztucznej inteligencji w diagnostyce wad postawy

Kolejnym istotnym kierunkiem badań będzie rozwój i implementacja metod sztucznej inteligencji w analizie wad postawy. Planowane jest zastosowanie zaawansowanych algorytmów uczenia maszynowego oraz sieci neuronowych do:

- automatycznej klasyfikacji wad postawy na podstawie analizy obrazowej i biomechanicznej,
- predykcji progresji skoliozy na podstawie danych historycznych i trendów rozwojowych pacjentów,

W ramach dalszych badań planowane jest przeprowadzenie testów skuteczności opracowanych algorytmów w warunkach klinicznych oraz ich optymalizacja pod kątem precyzji i powtarzalności wyników. Wykorzystanie sztucznej inteligencji będzie miało na celu zwiększenie dokładności diagnostyki oraz zautomatyzowanie analizy danych, co pozwoli na odciążenie specjalistów i skrócenie czasu diagnozy.

Dodatkowo, w ramach dalszego rozwoju planowane jest opracowanie algorytmów umożliwiających precyzyjny pomiar nachylenia głowy. Wraz z dynamicznym wzrostem liczby użytkowników urządzeń mobilnych, zarówno wśród dzieci, jak i dorosłych, coraz częściej obserwuje się zespół dolegliwości określany jako "szyja smartfonowa" (ang. text neck syndrome). Jest to schorzenie wynikające z długotrwałego pochylania głowy w kierunku ekranu telefonu, co prowadzi do przeciążenia struktur odcinka szyjnego kręgosłupa oraz powiązanych tkanek miękkich [180]. Zgodnie z badaniami opisanymi w [184], w pozycji neutralnej głowa człowieka waży około 4–5 kg. Jednak im bardziej pochyla się ona do przodu, tym większe obciążenie działa na odcinek szyjny kręgosłupa. Przy kącie nachylenia wynoszącym 15° siła ta wzrasta do 12 kg, przy 30° do 18 kg, a przy 60° może wynosić nawet 27 kg. To porównywalne z utrzymywaniem w dłoniach kilkunastokilogramowego ciężaru przez długi czas, RYS.



Rys. 102. Syndrom głowy smsmowej [184].

Jednym z widocznych skutków długotrwałego przeciążenia odcinka szyjnego kręgosłupa i nieprawidłowej postawy ciała jest wdowi garb [185]. Jest to zgrubienie tkanki u podstawy karku, na granicy szyi i pleców, wynikające z pogłębienia kifozy piersiowej oraz chronicznego wysunięcia głowy do przodu. Występowanie wdowiego garbu może prowadzić do:

- ograniczenia ruchomości odcinka szyjnego,
- przewlekłego bólu i sztywności karku,
- zaburzeń postawy i dalszego przeciążenia kręgosłupa,
- problemów neurologicznych, takich jak bóle głowy czy drętwienie kończyn górnych.



Rys. 103. Wdowi garb [185].

Ze względu na powszechne korzystanie ze smartfonów zarówno przez dzieci, jak i dorosłych, zasadne wydaje się rozszerzenie aplikacji o dedykowany moduł pomiarowy. Wykorzystanie ortometru do analizy odcinka szyjnego pozwoli na określenie kryteriów tzw. "pozycji smartfonowej", co umożliwi ocenę wpływu długotrwałego pochylania głowy na postawę użytkownika.

Jest to istotny problem zdrowotny, ponieważ przewlekłe przeciążenie odcinka szyjnego może prowadzić do bólu, ograniczenia ruchomości, a nawet trwałych zmian zwyrodnieniowych. Badania wykazują, że rosnąca liczba pacjentów, zwłaszcza w młodym wieku, doświadcza dolegliwości związanych z nieprawidłową postawą ciała spowodowaną długotrwałym użytkowaniem urządzeń mobilnych. Wczesne wykrywanie nieprawidłowości i ich korekcja mogą znacząco zmniejszyć ryzyko rozwoju przewlekłych schorzeń kręgosłupa w odcinku szyjnym.

7 PODSUMOWANIE

Celem wdrożeniowego projektu doktorskiego było opracowanie systemu do przesiewowych badań wad postawy dzieci i młodzieży przeznaczonego do wczesnego wykrywania skolioz. Opracowany system składa się z aplikacji programowej ORT oraz rozwiązania sprzętowego ORT-100 pełniącego funkcję ortometru, przeznaczonych do automatycznej analizy asymetrii grzbietu oraz krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa.

Przegląd literaturowy metod i technologii używanych do diagnozy skoliozy opisujący metody diagnostyczne, jak i informatyczne wykorzystywane w rozpoznawaniu skoliozy [103] przedstawiono w analizie zagadnienia w rozdziale 2. W tym rozdziale zaprezentowano także model badania postawy ciała z wykorzystaniem ortometru [141].

W ramach zrealizowanych prac opracowano stanowiska pomiarowe obrotowe, które pozwoliły wyznaczyć funkcje korygujące pomiar kąta rotacji tułowia, przy użyciu zaawansowanych metod numerycznych i różnych metod regresji. Zastosowanie tych metod umożliwiło znaczną redukcję błędów pomiarowych, których wartości zależne były od prędkości obrotowych. Opracowano również metodę kalibracji danych pomiarowych z inklinometru, opartą na aproksymacji wielomianowej. Pokazano metody wyznaczania modeli regresji wielomianowej oraz algorytmów uczenia maszynowego z użyciem sieci neuronowych, z wykorzystaniem lasu losowego i algorytmu K najbliższych sąsiadów. Wyznaczono dwa rodzaje modeli: modele bazujące na pomiarze kąta oraz modele bazujące na pomiarze kąta oraz prędkości kątowej. Każdy model został zweryfikowany poprzez estymację w zadanym zakresie pomiarowym wychylenia i prędkości kątowej. Skuteczność modeli wyznaczonych na stanowiskach obrotowych została zweryfikowana na stanowisku pomiarowym długości i rotacji kąta w ruchu liniowym ortometru po torze wzorcowym. Wyniki wykonanych prac przedstawione w rozdziale 3 udowadniają I hipotezę rozprawy - **zastosowanie metod regresji pozwala na zwiększenie** dokładności pomiarów z ortometru.

Dla wyznaczenia kąta rotacji tułowia oraz sumy maksimów garbów piersiowego i lędźwiowego do oceny asymetrii grzbietu opracowano metody wyznaczania parametrów wykorzystywanych w modelu badania postawy ciała , tj.:

- kąta rotacji tułowia ATR,
- sumy maksimów HS garbów piersiowego i lędźwiowego,
- położenia punktów wyznaczających poszczególne kręgi na osi drogi kręgosłupa,
- kątów krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa.

Metody te bazują na pomiarach z ortometru. W powiązaniu z parametrami wpisywanymi do ankiet wypełnianych przez personel medyczny pokazano ich zastosowanie w systemie eksperckim. Do opracowania systemu wykorzystano kliniczne reguły decyzyjne do wyznaczenia grupy ryzyka wystąpienia skoliozy idiopatycznej oraz rodzaju wad postawy na bazie eksperckiego drzewa decyzyjnego. Wyniki działania drzewa decyzyjnego zostały zweryfikowane przez eksperta w dziedzinie. Pokazano wyniki działań poszczególnych metod na rzeczywistych pomiarach dla wybranego pacjenta. Wszystkie metody zostały zaimplementowane w systemie do przesiewowych badań dzieci i młodzieży. Przedstawione w rozdziale 4 metody i wyniki badań udowadniają II hipotezę rozprawy, że **automatyczne wyznaczenie parametrów wykorzystywanych w modelu badania postawy ciała, pozwala na ocenę grupy ryzyka i wad postawy.**

W ostatniej części zaprezentowano wyniki wdrożenia opracowanych wcześniej metod w systemie do automatycznej analizy asymetrii grzbietu i krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa. Szczegółowo opisano założenia projektowe oraz wymagania normatywne dla systemu ORT, precyzujące proces projektowania oraz rozwoju oprogramowania. Przedstawiono funkcje ortometru elektronicznego ORT-100, architekturę aplikacji użytkowej ORT oraz strukturę bazy danych do przechowywania danych diagnostycznych, pomiarowych oraz scenariuszy badań wraz z ich implementacją. Pokazano schemat architektury oprogramowania zawierający poszczególne moduły programowe.

Przeprowadzono badania wykrywania skolioz u dzieci i młodzieży wykonanych w ośrodku rehabilitacji przez specjalistę z dziedziny medycyny z wykorzystaniem opracowanego systemu. Zaprezentowano analizę ilościową zebranych danych pomiarowych.

Na podstawie wyników badań dokonano oceny skuteczności metody automatycznego wyznaczania punktów charakterystycznych do analizy asymetrii grzbietu oraz krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa oraz wyznaczono grupy ryzyka wystąpienia skoliozy idiopatycznej.

Przedstawione w rozdziale 5 wyniki prac wdrożeniowych udowadniają III hipotezę rozprawy, że **metoda automatycznej analizy asymetrii grzbietu oraz krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa stanowi użyteczne narzędzie do wczesnego wykrywania skolioz u dzieci i młodzieży.**

W efekcie w Instytucie Techniki i Aparatury Medycznej ITAM (obecnie Centrum Inżynierii Biomedycznej, Sieć Badawcza Łukasiewicz - Krakowski Instytut Technologiczny) powstał kompleksowy system badań medycznych do wczesnego wykrywania detekcji deformacji kręgosłupa wraz z scenariuszami badań dla personelu medycznego. System udostępnia lekarzowi wstępną ocenę wad postawy oraz zalecenia postępowania dla pacjenta zagrożonego skoliozą w oparciu o pomiary kąta rotacji tułowia (asymetrii grzbietu) oraz kątów kifozy piersiowej

i lędźwiowej wraz z zakwalifikowaniem do odpowiedniej grupy ryzyka zagrożenia skoliozą. System pozwala na szybkie, nieinwazyjne i obiektywne przeprowadzenie oceny postawy oraz identyfikację potencjalnych wad we wczesnym stadium ich rozwoju.

Zastosowanie systemu bazodanowego umożliwia monitorowanie i archiwizowanie przeprowadzonych badań pacjentów. Natomiast zwiększenie dokładności pomiarów kąta z ortometru oraz zastosowanie opracowanych algorytmów do automatycznego wyznaczanie krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa umożliwia wczesne wykrycie zmian wad postawy u pacjentów, co wpływa na zwiększenie jakości diagnostyki lekarskiej w zakresie detekcji deformacji kręgosłupa i dostosowanie do niej wybranych zaleceń lekarskich.

Zaprezentowane rozwiązanie zostało nagrodzone przez Polską Izbę Rzeczników Patentowych w XIV edycji Konkursu Innowator Śląska (załącznik Zał. 1), a także przez Naczelną Izbę Lekarską w Konkursie Przychodnia Przyszłości w kategorii „Wdrożenie technologii lub wyrobu medycznego” (załącznik Zał. 2).

Bibliografia

- [1] Rogala, E.J.; Drummond, D.S.; Gurr, J. Scoliosis: Incidence and Natural History. A Prospective Epidemiological Study. *J. Bone Jt. Surg.* 1978, 60, 173–176.
- [2] Altaf, F.; Gibson, A.; Dannawi, Z.; Noordeen, H. Adolescent Idiopathic Scoliosis. *BMJ* 2013, 346, 1527–1537.
- [3] Bunnell, W.P. The Natural History of Idiopathic Scoliosis. *Clin. Orthop. Relat. Res.* 1988, 229, 20–25.
- [4] Kaufman, B.A. Congenital Intraspinous Anomalies: Spinal Dysraphism-Embryology, Pathology and Treatment. *Textb. Spinal Surg.* 1997, 1, 365–400.
- [5] Desai, S. Infantile Vertebral Scoliosis. Case Study. Available online: <https://radiopaedia.org/cases/63310> (accessed on 1 December 2021).
- [6] Jones, J. Neurodevelopmental Scoliosis. Case Study. Available online: <https://doi.org/10.53347/rID-89566> (accessed on 1 December 2021).
- [7] Jones, J. Idiopathic Scoliosis with Spondylolisthesis. Case Study. Available online: <https://doi.org/10.53347/rID-89456> (accessed on 1 December 2021).
- [8] Stokes, I.A. Axial Rotation Component of Thoracic Scoliosis. *J. Orthop. Res. Off. Publ. Orthop. Res. Soc.* 1989, 7, 702–708.
- [9] Asher, M.A.; Burton, D.C. Adolescent Idiopathic Scoliosis: Natural History and Long Term Treatment Effects. *Scoliosis* 2006, 1, 2.
- [10] Dubousset, J. Three-Dimensional Analysis of the Scoliotic Deformity (Chapter 22). *Pediatr. Spine Princ. Pract.* 1994, 1, 479–496.
- [11] Ferguson, A.B. The study and treatment of scoliosis. *South. Med. J.* 1930, 23, 116–120.
- [12] Cobb, R.J. Outline for Study of Scoliosis. *Instructional Course Lectures. Am. Acad. Orthop. Surg.* 1948, 261–275.
- [13] Zhou, G.-Q.; Jiang, W.-W.; Lai, K.-L.; Zheng, Y.-P. Automatic Measurement of Spine Curvature on 3-D Ultrasound Volume Projection Image with Phase Features. *IEEE Trans. Med. Imaging* 2017, 36, 1250–1262.
- [14] Cobb Angle Measurement. Case Study. Available online: <https://radiopaedia.org/cases/cobb-angle-measurement> (accessed on 1 December 2021).

- [15] Komeili, A.; Westover, L.M.; Parent, E.C.; Moreau, M.; El-Rich, M.; Adeeb, S. Surface Topography Asymmetry Maps Categorizing External Deformity in Scoliosis. *Spine J. Off. J. N. Am. Spine Soc.* 2014, 14, 973–983.e2.
- [16] Pruijs, J.E.; Hageman, M.A.; Keessen, W.; van der Meer, R.; van Wieringen, J.C. Variation in Cobb Angle Measurements in Scoliosis. *Skelet. Radiol.* 1994, 23, 517–520.
- [17] Watanabe, K.; Aoki, Y.; Matsumoto, M. An Application of Artificial Intelligence to Diagnostic Imaging of Spine Disease: Estimating Spinal Alignment from Moiré Images. *Neurospine* 2019, 16, 697–702.
- [18] Beekman, C.E.; Hall, V. Variability of Scoliosis Measurement from Spinal Roentgenograms. *Phys. Ther.* 1979, 59, 764–765.
- [19] Carman, D.L.; Browne, R.H.; Birch, J.G. Measurement of Scoliosis and Kyphosis Radiographs. Intraobserver and Interobserver Variation. *J. Bone Jt. Surg.* 1990, 72, 328–333.
- [20] Facanha-Filho, F.A.; Winter, R.B.; Lonstein, J.E.; Koop, S.; Novacheck, T.; L’Heureux, E.A.; Noren, C.A. Measurement Accuracy in Congenital Scoliosis. *J. Bone Jt. Surg.* 2001, 83, 42–45.
- [21] Goldberg, M.S.; Poitras, B.; Mayo, N.E.; Labelle, H.; Bourassa, R.; Cloutier, R. Observer Variation in Assessing Spinal Curvature and Skeletal Development in Adolescent Idiopathic Scoliosis. *Spine* 1988, 13, 1371–1377.
- [22] Gross, C.; Gross, M.; Kuschner, S. Error Analysis of Scoliosis Curvature Measurement. *Bull. Hosp. Jt. Dis. Orthop. Inst.* 1983, 43, 171–177.
- [23] Loder, R.T.; Urquhart, A.; Steen, H.; Graziano, G.; Hensinger, R.N.; Schlesinger, A.; Schork, M.A.; Shyr, Y. Variability in Cobb Angle Measurements in Children with Congenital Scoliosis. *J. Bone Jt. Surg. Br. Vol.* 1995, 77, 768–770.
- [24] Mok, J.M.; Berven, S.H.; Diab, M.; Hackbarth, M.; Hu, S.S.; Deviren, V. Comparison of Observer Variation in Conventional and Three Digital Radiographic Methods Used in the Evaluation of Patients with Adolescent Idiopathic Scoliosis. *Spine* 2008, 33, 681–686.
- [25] Morrissy, R.T.; Goldsmith, G.S.; Hall, E.C.; Kehl, D.; Cowie, G.H. Measurement of the Cobb Angle on Radiographs of Patients Who Have Scoliosis. Evaluation of Intrinsic Error. *J. Bone Jt. Surg.* 1990, 72, 320–327.
- [26] Oda, M.; Rauh, S.; Gregory, P.B.; Silverman, F.N.; Bleck, E.E. The Significance of Roentgenographic Measurement in Scoliosis. *J. Pediatr. Orthop.* 1982, 2, 378–382.

- [27] Bunnell, W.P. An Objective Criterion for Scoliosis Screening. *J. Bone Jt. Surg.* 1984, 66, 1381–1387.
- [28] Chowanska, J.; Kotwicki, T.; Rosadzinski, K.; Sliwinski, Z. School Screening for Scoliosis: Can Surface Topography Replace Examination with Scoliometer? *Scoliosis* 2012, 7, 9.
- [29] Bunnell, W.P. Selective Screening for Scoliosis. *Clin. Orthop. Relat. Res.* 2005, 40–45.
- [30] Będziński, R. *Biomechanika Inżynierska: Zagadnienia Wybrane*; Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej: Wrocław, Poland, 1997; ISBN 83-7085-240-8.
- [31] Mrozkowiak, M. *Uwarunkowania Wybranych Parametrów Postawy Ciała Dzieci i Młodzieży oraz ich Zmienność w Świetle Mory Projekcyjnej*; Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego: Zielona Góra, Poland, 2010; ISBN 978-83-7481-350-1.
- [32] Schulte, T.L.; Hierholzer, E.; Boerke, A.; Lerner, T.; Liljenqvist, U.; Bullmann, V.; Hackenberg, L. Raster Stereography versus Radiography in the Long-Term Follow-up of Idiopathic Scoliosis. *J. Spinal Disord. Tech.* 2008, 21, 23–28.
- [33] Harzmann, H.C. Optischer Gipsabdruck Hilft Bei Der Rückenanalyse. *Süddeutscher Orthopädenkongress Kongressausgabe* 1999, 2, 15.
- [34] Harzmann, H.C. Stellenwert Der Videorasterstereographie Als Schulärztliche Screeningmethode von Skoliotischen Fehlhaltungen Und Strukturellen Skoliosen. PhD Thesis, Ludwig-Maximilians-Universität, Medizinischen Fakultät, München, Germany, 2000.
- [35] Frerich, J.M.; Hertzler, K.; Knott, P.; Mardjetko, S. Comparison of Radiographic and Surface Topography Measurements in Adolescents with Idiopathic Scoliosis. *TOORTHJ* 2012, 6, 261–265.
- [36] Kalender, W.A. X-ray Computed Tomography. *Phys. Med. Biol.* 2006, 51, R29–R43.
- [37] Hoffman, D.A.; Lonstein, J.E.; Morin, M.M.; Visscher, W.; Harris, B.S.; Boice, J.D. Breast Cancer in Women with Scoliosis Exposed to Multiple Diagnostic x Rays. *J. Natl. Cancer Inst.* 1989, 81, 1307–1312.
- [38] Kutanzi, K.; Lumen, A.; Koturbash, I.; Miousse, I. Pediatric Exposures to Ionizing Radiation: Carcinogenic Considerations. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2016, 13, 1057.

- [39] IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Available online: <https://monographs.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/08/14-002.pdf> (accessed on 1 December 2021).
- [40] UNSCEAR 2013 Report to the General Assembly with Scientific Annexes Volume II: Scientific Annex B. 283. Available online: https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/UNSCEAR_2013_Report_Annex_B_Children.pdf (accessed on 1 December 2021).
- [41] Betsch, M.; Wild, M.; Jungbluth, P.; Thelen, S.; Hakimi, M.; Windolf, J.; Horstmann, T.; Rapp, W. The Rasterstereographic-Dynamic Analysis of Posture in Adolescents Using a Modified Matthiass Test. *Eur. Spine J.* 2010, 19, 1735–1739.
- [42] Coblentz, A.M.; Herron, R.E. (Eds.) NATO Symposium on Applications of Human Biostereoietrics; Proceedings Volume; Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers: Paris, France, 1980; Volume 166.
- [43] Frobin, W. Rasterstereography: A Photogrammetric Method for Measurement of Body Surfaces. *Photogramm. Eng. Remote. Sens.* 1981, 47, 1717–1724.
- [44] Hackenberg, L.; Hierholzer, E.; Pötzl, W.; Götze, C.; Liljenqvist, U. Rasterstereographic Back Shape Analysis in Idiopathic Scoliosis after Posterior Correction and Fusion. *Clin. Biomech.* 2003, 18, 883–889.
- [45] Mangone, M.; Raimondi, P.; Paoloni, M.; Pellanera, S.; Di Michele, A.; Di Renzo, S.; Vanadia, M.; Dimaggio, M.; Murgia, M.; Santilli, V. Vertebral Rotation in Adolescent Idiopathic Scoliosis Calculated by Radiograph and Back Surface Analysis-Based Methods: Correlation between the Raimondi Method and Rasterstereography. *Eur. Spine J.* 2013, 22, 367–371.
- [46] Schröder, J.; Schaar, H.; Korn, M.; Färber, I.; Ziegler, M.; Braumann, K.M.; Reer, R.; Mattes, K. Zur Sensitivität Und Reproduzierbarkeit Der Pedobarographie Mit Dem System PedoScan. *Deutsche Zeitschrift Sportmedizin* 2007, 58, 207.
- [47] Seiberlich, N.; Gulani, V.; Campbell, A.; Sourbron, S.; Doneva, M.I.; Calamante, F.; Hu, H.H. Quantitative Magnetic Resonance Imaging; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2020; ISBN 978-0-12-817058-8.
- [48] Yetişir, F. Local and Global SAR Constrained Large Tip Angle 3D KT-Points Parallel Transmit Pulse Design at 7 T, Massachusetts Institute of Technology: Massachusetts, 2014. Available online: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/87790> (accessed on 1 December 2021).

- [49] Davids, J.R.; Chamberlin, E.; Blackhurst, D.W. Indications for Magnetic Resonance Imaging in Presumed Adolescent Idiopathic Scoliosis. *J. Bone Jt. Surg.* 2004, 86, 2187–2195.
- [50] Maiocco, B.; Deeney, V.F.; Coulon, R.; Parks, P.F. Adolescent Idiopathic Scoliosis and the Presence of Spinal Cord Abnormalities. *Spine* 1997, 22, 2537–2541.
- [51] Do, T.M.D.; Fras, C.M.D.; Burke, S.M.D.; Widmann, R.F.M.D.; Rawlins, B.M.D.; Boachie-Adjei, O.M.D. Clinical Value of Routine Preoperative Magnetic Resonance Imaging in Adolescent Idiopathic Scoliosis. *J. Bone Jt. Surg.* 2001, 83, 577–579.
- [52] Wright, N. Imaging in Scoliosis. *Arch. Dis. Child.* 2000, 82, 38–40.
- [53] Zhu, C.; Huang, S.; Song, Y.; Liu, H.; Liu, L.; Yang, X.; Zhou, C.; Hu, B.; Chen, H. Surgical Treatment of Scoliosis-Associated with Syringomyelia: The Role of Syrx Size. *Neurol. India* 2020, 68, 299.
- [54] Shih, R.Y.; Koeller, K.K. Intramedullary Masses of the Spinal Cord: Radiologic-Pathologic Correlation. *RadioGraphics* 2020, 40, 1125–1145.
- [55] Bolognese, P.A.; Brodbelt, A.; Bloom, A.B.; Kula, R.W. Chiari I Malformation: Opinions on Diagnostic Trends and Controversies from a Panel of 63 International Experts. *World Neurosurg.* 2019, 130, e9–e16.
- [56] Rogers, B.P.; Haughton, V.M.; Arfanakis, K.; Meyerand, M.E. Application of Image Registration to Measurement of Intervertebral Rotation in the Lumbar Spine. *Magn. Reson. Med.* 2002, 48, 1072–1075.
- [57] Rogers, B.; Wiese, S.; Blankenbaker, D.; Meyerand, E.; Haughton, V. Accuracy of an Automated Method to Measure Rotations of Vertebrae from Computerized Tomography Data. *Spine* 2005, 30, 694–696.
- [58] Carro, P.A. Magnetic Resonance Imaging in Children with Scoliosis. *Semin. Musculoskelet. Radiol.* 1999, 3, 257–266.
- [59] Heinrich, A.; Reinhold, M.; Güttler, F.V.; Matziolis, G.; Teichgräber, U.K.-M.; Zippelius, T.; Strube, P. MRI Following Scoliosis Surgery? An Analysis of Implant Heating, Displacement, Torque, and Susceptibility Artifacts. *Eur. Radiol.* 2021, 31, 4298–4307.
- [60] Ahmad, F.U.; Sidani, C.; Fourzali, R.; Wang, M.Y. Postoperative Magnetic Resonance Imaging Artifact with Cobalt-Chromium versus Titanium Spinal Instrumentation. *J. Neurosurg. Spine* 2013, 19, 629–636.

- [61] Etemadifar, M.R.; Andalib, A.; Rahimian, A.; Nodushan, S.M.H.T. Cobalt Chromium-Titanium Rods versus Titanium-Titanium Rods for Treatment of Adolescent Idiopathic Scoliosis; Which Type of Rod Has Better Postoperative Outcomes? *Rev. Assoc. Med. Bras.* 2018, 64, 1085–1090.
- [62] Buzug, T.M. Computed Tomography. In *Springer Handbook of Medical Technology*; Krame, R., Hoffmann, K.P., Pozos, R.S., Eds.; Springer Handbooks; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2011.
- [63] Brenner, D.J.; Hall, E.J. Computed Tomography--an Increasing Source of Radiation Exposure. *N. Engl. J. Med.* 2007, 357, 2277–2284.
- [64] Yawn, B.P.; Yawn, R.A.; Hodge, D.; Kurland, M.; Shaughnessy, W.J.; Ilstrup, D.; Jacobsen, S.J. A Population-Based Study of School Scoliosis Screening. *JAMA* 1999, 282, 1427–1432.
- [65] Chen, K.; Zhai, X.; Sun, K.; Wang, H.; Yang, C.; Li, M. A Narrative Review of Machine Learning as Promising Revolution in Clinical Practice of Scoliosis. *Ann. Transl. Med.* 2021, 9, 67.
- [66] Yang, J.; Zhang, K.; Fan, H.; Huang, Z.; Xiang, Y.; Yang, J.; He, L.; Zhang, L.; Yang, Y.; Li, R.; et al. Development and Validation of Deep Learning Algorithms for Scoliosis Screening Using Back Images. *Commun. Biol.* 2019, 2, 390.
- [67] Pazos, V.; Cheriet, F.; Song, L.; Labelle, H.; Dansereau, J. Accuracy Assessment of Human Trunk Surface 3D Reconstructions from an Optical Digitising System. *Med. Biol. Eng. Comput.* 2005, 43, 11–15.
- [68] Jaremko, J.L.; Poncet, P.; Ronsky, J.; Harder, J.; Dansereau, J.; Labelle, H.; Zernicke, R.F. Estimation of Spinal Deformity in Scoliosis From Torso Surface Cross Sections. *Spine* 2001, 26, 1583–1591.
- [69] Komeili, A.; Westover, L.; Parent, E.C.; El-Rich, M.; Adeeb, S. Correlation Between a Novel Surface Topography Asymmetry Analysis and Radiographic Data in Scoliosis. *Spine Deform.* 2015, 3, 303–311.
- [70] Ramirez, L.; Durdle, N.G.; Raso, V.J.; Hill, D.L. A Support Vector Machines Classifier to Assess the Severity of Idiopathic Scoliosis From Surface Topography. *IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed.* 2006, 10, 84–91.
- [71] Bergeron, C.; Cheriet, F.; Ronsky, J.; Zernicke, R.; Labelle, H. Prediction of Anterior Scoliotic Spinal Curve from Trunk Surface Using Support Vector Regression. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 2005, 18, 973–983.

- [72] Liu, X.C.; Thometz, J.G.; Lyon, R.M.; Klein, J. Functional Classification of Patients with Idiopathic Scoliosis Assessed by the Quantec System. *Spine* 2001, 26, 1274–1279.
- [73] Zhang, J.; Lou, E.; Hill, D.L.; Raso, J.V.; Wang, Y.; Le, L.H.; Shi, X. Computer-Aided Assessment of Scoliosis on Posteroanterior Radiographs. *Med. Biol. Eng. Comput.* 2010, 48, 185–195.
- [74] Samuvel, B.; Thomas, V.; Mini, M.G.; Kumar, J.R. A Mask Based Segmentation Algorithm for Automatic Measurement of Cobb Angle from Scoliosis X-ray Image. In *Proceedings of the 2012 International Conference on Advances in Computing and Communications*, Cochin, India, 9–11 August 2012; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2012; pp. 110–113.
- [75] Zhang, J.; Li, H.; Lv, L.; Zhang, Y. Computer-Aided Cobb Measurement Based on Automatic Detection of Vertebral Slopes Using Deep Neural Network. *Int. J. Biomed. Imaging* 2017, 2017, 9083916.
- [76] Wu, W.; Liang, J.; Du, Y.; Tan, X.; Xiang, X.; Wang, W.; Ru, N.; Le, J. Reliability and Reproducibility Analysis of the Cobb Angle and Assessing Sagittal Plane by Computer-Assisted and Manual Measurement Tools. *BMC Musculoskelet. Disord.* 2014, 15, 33.
- [77] Shaw, M.; Adam, C.J.; Izatt, M.T.; Licina, P.; Askin, G.N. Use of the iPhone for Cobb Angle Measurement in Scoliosis. *Eur. Spine J.* 2012, 21, 1062–1068.
- [78] Dollár, P.; Appel, R.; Belongie, S.; Perona, P. Fast Feature Pyramids for Object Detection. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 2014, 36, 1532–1545.
- [79] Ronneberger, O.; Fischer, P.; Brox, T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2015.
- [80] Yongcheng, T.; Nian, W.; Fei, T.; Hemu, C. Automatic Measurement Algorithm of Scoliosis Cobb Angle Based on Deep Learning. *J. Phys. Conf. Ser.* 2019, 1187, 042100.
- [81] Forsberg, D.; Lundström, C.; Andersson, M.; Vavruch, L.; Tropp, H.; Knutsson, H. Fully Automatic Measurements of Axial Vertebral Rotation for Assessment of Spinal Deformity in Idiopathic Scoliosis. *Phys. Med. Biol.* 2013, 58, 1775–1787.
- [82] Anitha, H.; Prabhu, G.; Karunakar, A.K. Reliable and Reproducible Classification System for Scoliotic Radiograph Using Image Processing Techniques. *J. Med. Syst.* 2014, 38, 124.

- [83] Anitha, H.; Prabhu, G.K. Automatic Quantification of Spinal Curvature in Scoliotic Radiograph Using Image Processing. *J. Med. Syst.* 2012, 36, 1943–1951.
- [84] Sardjono, T.A.; Wilkinson, M.H.F.; Veldhuizen, A.G.; van Ooijen, P.M.A.; Purnama, K.E.; Verkerke, G.J. Automatic Cobb Angle Determination from Radiographic Images. *Spine* 2013, 38, E1256–E1262.
- [85] Sun, H.; Zhen, X.; Bailey, C.; Rasoulinejad, P.; Yin, Y.; Li, S. Direct Estimation of Spinal Cobb Angles by Structured Multi-Output Regression. In *Proceedings of the International Conference on Information Processing in Medical Imaging*, Boone, IA, USA, 25–30 June 2017.
- [86] Xue, W.; Islam, A.; Bhaduri, M.; Li, S. Direct Multitype Cardiac Indices Estimation via Joint Representation and Regression Learning. *IEEE Trans. Med. Imaging* 2017, 36, 2057–2067.
- [87] Wu, H.; Bailey, C.; Rasoulinejad, P.; Li, S. Automated Comprehensive Adolescent Idiopathic Scoliosis Assessment Using MVC-Net. *Med. Image Anal.* 2018, 48, 1–11.
- [88] Wang, L.; Xu, Q.; Leung, S.; Chung, J.; Chen, B.; Li, S. Accurate Automated Cobb Angles Estimation Using Multi-View Extrapolation Net. *Medical Image Analysis. Med. Image Anal.* 2019, 58, 101542.
- [89] Choi, R.; Watanabe, K.; Jinguji, H.; Fujita, N.; Ogura, Y.; Demura, S.; Kotani, T.; Wada, K.; Miyazaki, M.; Shigematsu, H.; et al. CNN-Based Spine and Cobb Angle Estimator Using Moire Images. *J. Med. Syst.* 2017, 5, 135–144.
- [90] Choi, R.; Watanabe, K.; Fujita, N.; Ogura, Y.; Matsumoto, M.; Demura, S.; Kotani, T.; Wada, K.; Miyazaki, M.; Shigematsu, H.; et al. Measurement of Vertebral Rotation from Moire Image for Screening of Adolescent Idiopathic Scoliosis. *IEEE Trans. Image Electron. Vis. Comput.* 2018, 6, 55–64.
- [91] Kokabu, T.; Kanai, S.; Kawakami, N.; Uno, K.; Kotani, T.; Suzuki, T.; Tachi, H.; Abe, Y.; Iwasaki, N.; Sudo, H. An Algorithm for Using Deep Learning Convolutional Neural Networks with Three Dimensional Depth Sensor Imaging in Scoliosis Detection. *Spine J.* 2021, 21, 980–987.
- [92] Sudo, H.; Kokabu, T.; Abe, Y.; Iwata, A.; Yamada, K.; Ito, Y.M.; Iwasaki, N.; Kanai, S. Automated Noninvasive Detection of Idiopathic Scoliosis in Children and Adolescents: A Principle Validation Study. *Sci. Rep.* 2018, 8, 17714.
- [93] Wang, L.; Xie, C.; Lin, Y.; Zhou, H.-Y.; Chen, K.; Cheng, D.; Dubost, F.; Collery, B.; Khanal, B.; Khanal, B.; et al. Evaluation and Comparison of Accurate

- Automated Spinal Curvature Estimation Algorithms with Spinal Anterior-Posterior X-ray Images: The AASCE2019Challenge. *Medical Image Analysis (MedIA)*. *Med. Image Anal.* 2021, 72, 102115.
- [94] Pang, S.; Feng, Q.; Leung, S.; Nachum, I.B.; Li, S. Direct Automated Quantitative Measurement of Spine via Cascade Amplifier Regression Network. In *Proceedings of the International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, Granada, Spain, 16–20 September 2018.
 - [95] Huang, J.; Shen, H.; Chen, B.; Wang, Y.; Li, S. Segmentation of Paraspinal Muscles at Varied Lumbar Spinal Levels by Explicit Saliency-Aware Learning. In *Proceedings of the 23rd International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI)*, Lima, Peru, 4–8 October 2020.
 - [96] Han, Z.; Wei, B.; Mercado, A.; Leung, S.; Li, S. Spine-GAN: Semantic Segmentation of Multiple Spinal Structures. *Med. Image Anal.* 2018, 50, 23–35.
 - [97] Chang, H.; Zhao, S.; Zheng, H.; Li, S. Multi-Vertebrae Segmentation from Arbitrary Spine MRI Images under Global View. In *Proceedings of the 23rd International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI)*, Lima, Peru, 4–8 October 2020.
 - [98] Zhang, R.; Xiao, X.; Liu, Z.; Li, Y.; Li, S. Multi-Task Relational Learning Network for MRI Vertebral Localization, Identification and Segmentation. *IEEE J. Biomed. Health Inform.* 2020, 24, 2902–2911.
 - [99] Lin, L.; Tao, X.; Pang, S.; Su, Z.; Lu, H.; Li, S.; Feng, Q.; Chen, B. Multiple Axial Spine Indices Estimation via Dense Enhancing Network with Cross-Space Distance-Preserving Regularization. *IEEE J. Biomed. Health Inform.* 2020, 24, 3248–3257.
 - [100] Hong, Y.; Wei, B.; Han, Z.; Li, X.; Zheng, Y.; Li, S. MMCL-Net: Spinal Disease Diagnosis in Global Mode Using Progressive Multi-Task Joint Learning. *Neurocomputing* 2020, 399, 307–316.
 - [101] Zhang, D.; Chen, B.; Li, S. Sequential Conditional Reinforcement Learning for Simultaneous Vertebral Body Detection and Segmentation with Modeling the Spine Anatomy. *Med. Image Anal.* 2020, 67, 101861.
 - [102] Zhao, S.; Wu, X.; Chen, B.; Li, S. Automatic Spondylolisthesis Grading from MRIs across Modalities Using Faster Adversarial Recognition Network. *Med. Image Anal.* 2019, 58, 101533.

- [103] Karpel, I.; Ziębiński, A.; Kluszczyński, M.; Feige, D. A Survey of Methods and Technologies Used for Diagnosis of Scoliosis. *Sensors* 2021, 21, 8410. <https://doi.org/10.3390/s21248410>
- [104] Pope MH, Stokes IA, Moreland M. The biomechanics of scoliosis. *Crit Rev Biomed Eng.* 1984;11(3):157-88. PMID: 6391812.
- [105] Weinstein SL, Dolan LA, Spratt KF, Peterson KK, Spoonamore MJ, Ponseti IV. Health and function of patients with untreated idiopathic scoliosis: a 50-year natural history study. *JAMA.* 2003 Feb 5;289(5):559-67. doi: 10.1001/jama.289.5.559. PMID: 12578488.
- [106] Weinstein SL. The Natural History of Adolescent Idiopathic Scoliosis. *J Pediatr Orthop.* 2019 Jul;39(Issue 6, Supplement 1 Suppl 1):S44-S46. doi: 10.1097/BPO.0000000000001350. PMID: 31169647.
- [107] de Kleuver M, Faraj SSA, Haanstra TM, Wright AK, Polly DW, van Hooff ML, Glassman SD; COSSCO study group. The Scoliosis Research Society adult spinal deformity standard outcome set. *Spine Deform.* 2021 Sep;9(5):1211-1221. doi: 10.1007/s43390-021-00334-2. Epub 2021 Apr 6. PMID: 33822320; PMCID: PMC8363534.
- [108] Czaprowski D., Tyrakowski M., Dembińska A., Zasady prowadzenia badań przesiewowych w kierunku wczesnego wykrywania skoliozy idiopatycznej – rekomendacje Komitetu Rehabilitacji, Kultury Fizycznej i Integracji Społecznej Polskiej Akademii Nauk, <https://www.praktycznafizjoterapia.pl/artukul/zasady-prowadzenia-badan-przesiewowych-w-kierunku-wczesnego-wykrywania-skoliozy-idiopatycznej-rekomendacje-komitetu-rehabilitacji-kultury-fizycznej-i-integracji-spolecznej-polskiej-akademii-nauk> (dostęp 26.08.2024).
- [109] Menger RP, Sin AH. Adolescent Idiopathic Scoliosis. [Updated 2023 Apr 3]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK499908/> (dostęp 26.08.2024).
- [110] Plaszewski M, Nowobilski R, Kowalski P, Cieslinski M. Screening for scoliosis: different countries' perspectives and evidence-based health care. *Int J Rehabil Res.* 2012 Mar;35(1):13-9. doi: 10.1097/MRR.0b013e32834df622. PMID: 22123730.
- [111] Labelle, H., Richards, S.B., De Kleuver, M. et al. Screening for adolescent idiopathic scoliosis: an information statement by the scoliosis research society

- international task force. *Scoliosis* 8, 17 (2013). <https://doi.org/10.1186/1748-7161-8-17>
- [112] Grivas TB, Wade MH, Negrini S, O'Brien JP, Maruyama T, Hawes MC, Rigo M, Weiss HR, Kotwicki T, Vasiliadis ES, Sulam LN, Neuhaus T. SOSORT consensus paper: school screening for scoliosis. Where are we today? *Scoliosis*. 2007 Nov 26;2:17. doi: 10.1186/1748-7161-2-17. PMID: 18039374; PMCID: PMC2228277.
- [113] Reamy, Brian V and Joseph B. Slakey. "Adolescent idiopathic scoliosis: review and current concepts." *American family physician* 64 1 (2001): 111-6 .
- [114] Adobor, R.D., Joranger, P., Steen, H. et al. A health economic evaluation of screening and treatment in patients with adolescent idiopathic scoliosis. *Scoliosis* 9, 21 (2014). <https://doi.org/10.1186/s13013-014-0021-8>
- [115] Hresko MT. Clinical practice. Idiopathic scoliosis in adolescents. *N Engl J Med*. 2013 Feb 28;368(9):834-41. doi: 10.1056/NEJMcpl209063. PMID: 23445094.
- [116] Badania przesiewowe skoliozy idiopatycznej u młodzieży: <https://podyplomie.pl/pediatrica/25184%2Cbadania-przesiewowe-skoliozy-idiopatycznej-u-mlodziezy> (dostęp 26.08.2024).
- [117] Test Adamsa: <https://fizjoterapeuty.pl/testy-funkcjonalne/test-adamsa.html> (dostęp 26.08.2024).
- [118] Jak samodzielnie kontrolować skoliozę – „torsion bottle” czyli skoliometr z butelki z wodą: <https://akademiarehasport.pl/blog/jak-samodzielnie-kontrolowac-skolioze-torsion-bottle-czyli-skoliometr-z-butelki-z-woda/> (dostęp 26.08.2024).
- [119] Skolioza – czym jest? Pakiet informacji.: <https://fizjopunkt.pl/skolioza-czym-jest-pakiet-informacji/> (dostęp 26.08.2024).
- [120] Płaszewski M, Grantham W, Jespersen E. Screening for scoliosis - New recommendations, old dilemmas, no straight solutions. *World J Orthop*. 2020 Sep 18;11(9):364-379. doi: 10.5312/wjo.v11.i9.364. PMID: 32999857; PMCID: PMC7507078.
- [121] Goldberg CJ, Dowling FE, Fogarty EE, Moore DP. School scoliosis screening and the United States Preventive Services Task Force. An examination of long-term results. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1995 Jun 15;20(12):1368-74. PMID: 7676334.
- [122] American Academy of Orthopaedic Surgeons: <https://posna.org/POSNA/media/Documents/Position%20Statements/1122-Screening-for-the-Early-Detection-of-Idiopathic-Scoliosis-in-Adolescents.pdf> (dostęp 26.08.2024).

- [123] Status pedagogiki zdrowia w Niemczech:
<https://journals.umcs.pl/lrp/article/view/10572/0> (dostęp 26.08.2024).
- [124] Grivas, T.B., Wade, M.H., Negrini, S. et al. SOSORT consensus paper: school screening for scoliosis. Where are we today?. *Scoliosis* 2, 17 (2007).
- [125] Hashimoto H, Sase T, Arai Y, Maruyama T, Isobe K, Shouno Y. Validation of a Japanese version of the Scoliosis Research Society-22 Patient Questionnaire among idiopathic scoliosis patients in Japan. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2007 Feb 15;32(4):E141-6. doi: 10.1097/01.brs.0000255220.47077.33. PMID: 17304124.
- [126] Siripanyakhemakul W, Permpool K, Seng-Iad S. Effectiveness of orthotic treatment for adolescent idiopathic scoliosis: a scoping review protocol of systematic reviews. *BMJ Open*. 2023 Nov 8;13(11):e078064. doi: 10.1136/bmjopen-2023-078064. PMID: 37940156; PMCID: PMC10632824.
- [127] Scoliosis in Children: Early Identification Tips:
<https://treatingscoliosis.com/blog/early-identification-scoliosis-children/> (dostęp 26.08.2024).
- [128] Pyatakova G.V., Okoneshnikova O.V., Kozhevnikova A.O., Vissarionov S.V. Psychological aspects of treatment and rehabilitation of patients with adolescent idiopathic scoliosis: research analysis // *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery*. - 2019. - Vol. 7. - N. 2. - P. 103-115.
- [129] Skoliometr: <https://medwil.pl/pl/p/Skoliometr-Bunnella/398> (dostęp 26.08.2024).
- [130] Colombo, T., Mangone, M., Agostini, F., Bernetti, A., Paoloni, M., Santilli, V., ... & Palagi, L. (2021). Supervised and unsupervised learning to classify scoliosis and healthy subjects based on non-invasive rasterstereography analysis. *Plos One*, 16(12), e0261511. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261511>
- [131] Horng, M., Kuok, C., Fu, M., Lin, C., & Sun, Y. (2019). Cobb angle measurement of spine from x-ray images using convolutional neural network. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2019, 1-18.
<https://doi.org/10.1155/2019/6357171>
- [132] Krekoukias, G., Koumantakis, G., Nikolaou, V., & Soultanis, K. (2022). Study on the reliability and accuracy of scolioscope, a new digital scoliometer. *Diagnostics*, 12(1), 142. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12010142>
- [133] Reuver, S., Brink, R., Lee, T., Zheng, Y., Beek, F., & Castelein, R. (2020). Cross-validation of ultrasound imaging in adolescent idiopathic scoliosis. *European Spine Journal*, 30(3), 628-633. <https://doi.org/10.1007/s00586-020-06652-9>

- [134] Sanz-Pena, I., Arachchi, S., Curtis-Woodcock, N., Silva, P., McGregor, A., & Newell, N. (2022). Obtaining patient torso geometry for the design of scoliosis braces. a study of the accuracy and repeatability of handheld 3d scanners. *Prosthetics and Orthotics International*, 46(4), e374-e382.
<https://doi.org/10.1097/pxr.0000000000000118>
- [135] Sikkandar, M., Alhashim, M., Alassaf, A., AlMohimeed, I., Alhussaini, K., Aleid, A., & Begum, S. (2024). Unsupervised local center of mass based scoliosis spinal segmentation and cobb angle measurement. *Plos One*, 19(3), e0300685.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300685>
- [136] Wong, J., Reformat, M., Parent, É., & Lou, E. (2024). Validity and accuracy of automatic cobb angle measurement on 3d spinal ultrasonographs for children with adolescent idiopathic scoliosis: sosort 2024 award winner. *European Spine Journal*.
<https://doi.org/10.1007/s00586-024-08376-6>
- [137] Wong, Y., Lai, K., Zheng, Y., Wong, L., Ng, B., Hung, A., ... & Lam, T. (2019). Is radiation-free ultrasound accurate for quantitative assessment of spinal deformity in idiopathic scoliosis (is): a detailed analysis with eos radiography on 952 patients. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 45(11), 2866-2877.
<https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2019.07.006>
- [138] Xie, K., Zhu, S., Lin, J., Li, Y., Huang, J., Lei, W., ... & Yan, Y. (2024). A deep learning model to diagnose and evaluate adolescent idiopathic scoliosis using biplanar radiographs.. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5276748/v1>
- [139] Zheng, R., Hill, D., Hedden, D., Mahood, J., Moreau, M., Southon, S., ... & Lou, E. (2018). Factors influencing spinal curvature measurements on ultrasound images for children with adolescent idiopathic scoliosis (ais). *Plos One*, 13(6), e0198792.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198792>
- [140] Yılmaz, H., Büyükaslan, A., Özkan, A., Turan, Z., Tuna, F., Tunç, H., ... & Özdoğan, S. (2023). A new clinical tool for scoliosis risk analysis: scoliosis tele-screening test. *Asian Spine Journal*, 17(4), 656-665.
<https://doi.org/10.31616/asj.2022.0299>
- [141] Kluszczyński M, Sobotnicki A, Sobotnicka E, Feige D, Michnik A, Sobiech M, Nowak G., Karpel I. „Model badania postawy ciała AFA-B z wykorzystaniem przyrządu Orthometr MK w ocenie ryzyka rozwoju skoliozy idiopatycznej u dzieci i młodzieży”. W: Taratuta A, Antonowicz M, Lisoń-Kubica J, Rynkus B, Orłowska A, redaktorzy. „Standaryzacja, kompleksowość i spersonalizowane metody leczenia

- wad rozwojowych i schorzeń u dzieci”. Konferencja naukowa, Chorzów 2024. Zabrze: J&L Leszek Żochowski; 2024. p. 141–148.
- [142] Kasperczyk, T.: *Wady postawy ciała - diagnostyka i leczenie*. Firma Handlowo-Uslugowa „Kasper”, Kraków, Poland (2004).
- [143] Matyja, M.: Neuro-rozwojowa analiza wad postawy ciała u dzieci i młodzieży. *Physiotherapy and Health Activity*, AWF Katowice (2013).
- [144] Nowotny, J.: Neurofizjologiczne aspekty korekcji odchyleń od prawidłowej postawy ciała. *Dysfunkcje kręgosłupa – diagnostyka i terapia*, AWF Katowice (1993).
- [145] Department of Paediatrics, Paediatric Nephrology and Allergology, Military Institute of Medicine, Warsaw, Poland. Head of the Department: Associate Professor Bolesław Kalicki, MD, PhD et al.: Postural defects in children and teenagers as one of the major issues in psychosomatic development. *Pediatr Med Rodz*. 13, 1, 72-78 (2017).
- [146] Fazal, M., Edgar, M.: Re: Detection of adolescent idiopathic scoliosis. *Acta Orthopaedica Belgica*. 72, 184-6 (2006).
- [147] Grivas, T.B. et al.: SOSORT consensus paper: school screening for scoliosis. Where are we today? *Scoliosis*. 2, 1, 17 (2007).
- [148] Kluszczyński, M. et al.: Prognostic value of measuring the angles of lumbar lordosis and thoracic kyphosis with the Saunders inclinometer in patients with low back pain. *Polish Annals of Medicine*. 24, 1, 31-35 (2017).
- [149] Kowalski, I.M. et al.: Analysis of diagnostic methods in trunk deformities in the developmental age. *Polish Annals of Medicine*. 20, 1, 43-50 (2013).
- [150] Thilagaratnam, S.: School-based screening for scoliosis: Is it cost-effective? *Singapore Medical Journal*. 48, 1012-7 (2007).
- [151] Bunnell, W.P.: An objective criterion for scoliosis screening. *J. Bone Jt. Surg.* (1984).
- [152] *Lectures on the Pathology and Treatment of Lateral and Other Forms of Curvature of the Spine*. PMC, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5183899/>, last accessed 2024/03/28.
- [153] Legaye, J., Duval-Beaupère, G.: Sagittal plane alignment of the spine and gravity: a radiological and clinical evaluation. *Acta Orthop Belg*. 71, 2, 213-220 (2005).

- [154] Schlosser, T.P.C. et al.: Differences in early sagittal plane alignment between thoracic and lumbar adolescent idiopathic scoliosis. *The Spine Journal*. 14, 2, 282-290 (2014).
- [155] Vidal, C. et al.: Reliability of cervical lordosis and global sagittal spinal balance measurements in adolescent idiopathic scoliosis. *Eur. Spine J.* 22, 6, 1362-1367 (2013).
- [156] D'Amico, M. et al.: Leg Length Discrepancy in Scoliotic Patients. In: *Res. Spinal Deform.* pp. 146-150 (2012).
- [157] Brady, R.J. et al.: Limb Length Inequality: Clinical Implications for Assessment and Intervention. *J Orthop Sports Phys Ther.* 33, 5, 221-234 (2003).
- [158] Czaprowski, D. et al.: Joint hypermobility in children with idiopathic scoliosis: *SOSORT award 2011 winner. Scoliosis.* 6, 1, 22 (2011).
- [159] Moseley, C.F.: Leg-Length Discrepancy. *Pediatric Clinics of North America.* 33, 6, 1385-1394 (1986).
- [160] Smits-Engelsman, B. et al.: Beighton Score: A Valid Measure for Generalized Hypermobility in Children. *The Journal of Pediatrics.* 158, 1, 119-123.e4 (2011).
- [161] Negrini, S. et al.: 2016 SOSORT guidelines; orthopaedic and rehabilitation treatment of idiopathic scoliosis during growth. *Scoliosis.* 13, 1, 3 (2018).
- [162] Sobczyk, M. *Statystyka*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2021.
- [163] Stanisław, A. *Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem programu Statistica PL*. Tom 1–3. StatSoft, 2006.
- [164] Aczel, A. *Statystyka w zarządzaniu*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2019.
- [165] Pojęcia stosowane w statystyce publicznej,
<https://stat.gov.pl/metainformacje/slownik-pojec/pojecia-stosowane-w-statystyce-publicznej/lista.html>, (dostęp: 20.01.2025).
- [166] Internetowy Podręcznik Statystyki,
https://www.statsoft.pl/textbook/stathome_stat.html, (dostęp: 20.01.2025).
- [167] Hagan, M.T., Demuth, H.B., Beale, M.H. and De Jesús, O. (2014) *Neural Network Design*. 2nd Edition, Martin Hagan.
- [168] Yu, H. and Wilamowski, B.M. (2011) *Levenberg-Marquardt Training. Industrial Electronics Handbook*, 5, 1-16.
https://www.eng.auburn.edu/~wilambm/pap/2011/K10149_C012.pdf, (dostęp: 20.01.2025).

- [169] Howard Demuth, Mark Beale, *Neural Network Toolbox, User's Guide*, http://cda.psych.uiuc.edu/matlab_pdf/nnet.pdf, (dostęp: 20.01.2025).
- [170] Kit Yan Chan, Bilal Abu-Salih, Raneem Qaddoura, Ala' M. Al-Zoubi, Vasile Palade, Duc-Son Pham, Javier Del Ser, Khan Muhammad, *Deep neural networks in the cloud: Review, applications, challenges and research directions*, Neurocomputing, Volume 545, 2023, 126327, ISSN 0925-2312.
- [171] Thanasis Kotsiopoulos, Panagiotis Sarigiannidis, Dimosthenis Ioannidis, Dimitrios Tzovaras, *Machine Learning and Deep Learning in smart manufacturing: The Smart Grid paradigm*, Computer Science Review, Volume 40, 2021, 100341, ISSN 1574-0137,
- [172] Anke Meyer-Baese, Volker Schmid, Chapter 7 - Foundations of Neural Networks, Editor(s): Anke Meyer-Baese, Volker Schmid, *Pattern Recognition and Signal Analysis in Medical Imaging (Second Edition)*, Academic Press, 2014, Pages 197-243, ISBN 9780124095458.
- [173] Pijush Dutta, Shobhandeb Paul, Asok Kumar, Chapter 25 - *Comparative analysis of various supervised machine learning techniques for diagnosis of COVID-19*, Editor(s): Suman Lata Tripathi, Valentina E. Balas, S.K. Mohapatra, Kolla Bhanu Prakash, Janmenjoy Nayak, *Electronic Devices, Circuits, and Systems for Biomedical Applications*, Academic Press, 2021, Pages 521-540, ISBN 9780323851725.
- [174] Donghui Xu, Xiang Xu, Michael C. Forde, Antonio Caballero, *Concrete and steel bridge Structural Health Monitoring—Insight into choices for machine learning applications*, Construction and Building Materials, Volume 402, 2023, 132596, ISSN 0950-0618.
- [175] Kramer, O. (2013). *K-Nearest Neighbors*. In: *Dimensionality Reduction with Unsupervised Nearest Neighbors*. Intelligent Systems Reference Library, vol 51. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38652-7_2
- [176] Zhang Z. *Introduction to machine learning: k-nearest neighbors*. Ann Transl Med. 2016 Jun;4(11):218. doi: 10.21037/atm.2016.03.37.
- [177] „Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2017/ 745 - z dnia 5 kwietnia 2017 r. - w sprawie wyrobów medycznych, zmiany dyrektywy 2001/ 83/ WE, rozporządzenia (WE) nr 178/ 2002 i rozporządzenia (WE) nr 1223/ 2009 oraz uchylenia dyrektyw Rady 90/ 385/ EWG i 93/ 42/ EWG”

- [178] „Dyrektywa rady 93/42/EWG z dnia 14 czerwca 1993 r. dotycząca wyrobów medycznych”, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:31993L0042>.
- [179] M. Mishra, V. Dubey, P. Mishra and I. Khan. "MEMS Technology: A Review." *Journal of Engineering Research and Reports* (2019).
<https://doi.org/10.9734/JERR/2019/V4I116891>.
- [180] LSM6DS3TR-C iNEMO inertial module datasheet. Available online:
<https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm6ds3tr-c.pdf> (dostęp 01.03.2025)
- [181] Shahriari, B., Swersky, K., Wang, Z., Adams, R. P., & de Freitas, N. (2016). Taking the human out of the loop: A review of Bayesian optimization. *Proceedings of the IEEE*, 104(1), 148–175. DOI: 10.1109/JPROC.2015.2494218
- [182] Ghada S. Humaid and Abdellatif I. Moustafa. 2021. Experimental Analysis of Received Signals Strength in Bluetooth Low Energy in Crowd Environments. In Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Communications Management (ICCCM '21). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 136–142. <https://doi.org/10.1145/3479162.3479183>
- [183] Citko A., „Syndrom szyi smartfonowej”, Farmakoterapia, E-ISSN 2353-8597; ISSN 1231-028X; nr art. Lek.202411.05, (2024).
- [184] Text Neck:<https://www.npr.org/sections/thetwo-way/2014/11/20/365473750/keep-your-head-up-text-neck-can-take-a-toll-on-the-spine> (dostęp 26.08.2024).
- [185] Wdowi garb: <https://rehabilitacja-masaz.opole.pl/wdowi-garb/> (dostęp 26.08.2024).

Spis rysunków

- Rys. 1. (a) 4-miesięczny chłopiec urodzony jako mały w stosunku do wieku ciążowego, w 37 tygodniu, u którego początkowo stwierdzono asymetrię zarówno lewej, jak i prawej strony przedniej i tylnej klatki piersiowej oraz potwierdzoną skoliozę piersiowo-lędźwiową i anomalie kręgów na podstawie zwykłej radiografii z pomiarem kąta Cobba wynoszącym 30 stopni, (Sonal Desai, Radiopedia.org, rID: 63310 na licencji Creative Commons (CC BY 3.0)). [5]; (b) Zdjęcia rentgenowskie dziewczynki z młodzieńczą skoliozą idiopatyczną (Radiopaedia.org, rID: 89566 (CC BY 3.0)). [6]; oraz (c) ciężka skolioza młodzieńcza lewej strony klatki piersiowej, (Radiopaedia.org, rID: 89456 (CC BY 3.0)) [7]..... 15
- Rys. 2. Pomiar kąta Cobba. Linie styczne są rysowane od górnej płyty końcowej górnego kręgu i dolnej płyty końcowej dolnego kręgu. Kąt utworzony na przecięciu tych dwóch linii to kąt Cobba. Kąt Cobba wynoszący co najmniej 10 stopni jest niezbędny do zdiagnozowania skoliozy. (Radiopaedia.org, rID: 49374, (CC BY 3.0)). [14] Kąt Cobba jest definiowany jako kąt pomiędzy liniami stycznymi (kąt a) lub kąt pomiędzy dwiema liniami prostopadłymi (linie ciągłe) do stycznych (kąt b). 21
- Rys. 3. Przykład wielowarstwowej sieci MLP i sieci splotowej CNN [103]..... 31
- Rys. 4. Skoliometr Bunnella – przyrząd do pomiaru asymetrii tułowia stosowany w diagnostyce skoliozy, źródło: [129]..... 49
- Rys. 5. Cyfrowy skoliometr Scolioscope, źródło: [132]. 50
- Rys. 6. Skany uzyskane przez Sanz-Pena za pomocą ręcznych skanerów 3D. Zostały one wykorzystane do oceny geometrii torsu pacjentów ze skoliozą oraz porównania różnych metod skanowania pod kątem ich przydatności w projektowaniu gorsetów ortopedycznych, źródło: [134] 51
- Rys. 7. Kąt Cobba mierzony na zdjęciu rentgenowskim PA; zdjęcie z lewej oraz kąt krzywizny wieńcowej mierzony na projekcji wieńcowej ultrasonografu, z zaznaczonymi środkami warstw (na zielono) i odpowiednimi parami (na czerwono); zdjęcie z prawej, źródło: [136]. 54

Rys. 8. Obraz projekcji objętościowej kręgosłupa z ultrasonografią pokazujący linię wyrostków kolczystych (oznaczoną czerwoną linią), za pomocą której automatycznie mierzono SPA (kąt wyrostka kolczystego), źródło: [137].	56
Rys. 9. Parametry postawy ciała badane w algorytmie AFAB.	58
Rys. 10. Stanowisko obrotowe pomiaru kąta (w różnych fazach cyklu)	68
Rys. 11. Schemat stanowiska obrotowego pomiaru kąta wychylenia.	70
Rys. 12. Okno aplikacji narzędziowej do weryfikacji i filtracji plików z danymi pomiarowymi	72
Rys. 13. Wykres wychylenia silnika krokowego w jednym cyklu – badania wstępne.	72
Rys. 14. Wykres prezentujący kąt wzorcowy silnika krokowego (stepper) oraz uśredniony kąt wyznaczony na podstawie wskazań akcelometru.	73
Rys. 15. Wykres obrazujący średnią różnicę między kątem wzorcowym a średnim kątem wyznaczonym na podstawie wskazań akcelometru oraz prędkości kątowej	73
Rys. 16. Wykresy regresji liniowej dla kierunku w lewo i prawo wraz z odpowiadającymi im funkcjami regresji.	73
Rys. 17. Wykres kąta wzorcowego silnika krokowego (stepper) oraz uśrednionego kąta wyznaczonego po zastosowaniu poprawek na bazie regresji liniowej.	74
Rys. 18. Wykres prędkości kątowej oraz średniej różnicy pomiędzy wzorcem a kątem wyznaczonym z wykorzystaniem regresji liniowej.	74
Rys. 19. Wykres kąta wychylenia w jednym cyklu obrotowym stanowiska pomiarowego	74
Rys. 20. Wykres kąta wzorcowego [°] oraz kąta wyznaczonego [°] na podstawie wskazań akcelometru.	75
Rys. 21. Wykresy estymacji pomiarów kąta do wzorca – u góry dla kierunku WZero, pośrodku MZero, na dole Zero.	78
Rys. 22. Wykres zależności minimalnej wartości funkcji celu od liczby ewaluacji funkcji	86

Rys. 23. Parametry treningu sieci neuronowej (a), struktura modelu sieci neuronowej (b), przebieg funkcji błędu (MSE) podczas uczenia sieci (c), stan procesu uczenia sieci neuronowej (d)	87
Rys. 24. Wykresy estymacji kąta na bazie pomiarów filtrowanych do wzorca – u góry dla kierunku WZero, pośrodku MZero, na dole Zero.....	91
Rys. 25. Wykres błędów MAE pomiarów kąta na bazie akcelerometru	100
Rys. 26. Wykres błędów MAE estymacji modeli dla danych surowych	106
Rys. 27. Wykres błędów MAE estymacji modeli z grupy EstWiel dla danych surowych	107
Rys. 28. Wykres błędów MAE estymacji modeli z grupy EstANN dla danych surowych	108
Rys. 29. Wykres błędów MAE estymacji modeli z grupy EstANN dla danych surowych – dla wyższych prędkości kątowych	108
Rys. 30. Wykres błędów MAE estymacji dla danych surowych modeli uwzględniających prędkość kątową.....	109
Rys. 31. Wykres błędów MAE estymacji dla danych surowych - najlepszy model EstRegWiel	110
Rys. 32. Wykres błędów MAE metod pomiarowych – surowych pomiarów z akcelerometru (Pomiary.ACC) oraz uśrednionych (Pomiary.ACC.Średnie).....	111
Rys. 33. Wykres błędów MAE estymacji modeli dla danych uśrednionych	119
Rys. 34. Wykres błędów MAE estymacji modeli z grupy EstANN dla danych uśrednionych ..	120
Rys. 35. Wykres błędów MAE estymacji modeli z grupy EstWiel dla danych uśrednionych ...	121
Rys. 36. Wykres błędów MAE estymacji dla danych uśrednionych modeli uwzględniających prędkość kątową	122
Rys. 37. Wykresy błędów MAE estymacji modeli EstRegWiel dla danych uśrednionych (wykres górny pokazuje także Pomiary.ACC.Średnie).....	123

Rys. 38. Wykres błędów MAE metod pomiarowych – surowych pomiarów z akcelerometru (Pomiary.ACC), akcelerometru i żyroskopu (Pomiary.ACC.GYRO), uśrednionych z akcelerometru (Pomiary.ACC.Średnie).....	125
Rys. 39. Wykres błędów MAE estymacji modeli dla danych z ACC i GYRO	127
Rys. 40. Wykres błędów MAE estymacji modeli z grupy EstANN dla danych z ACC i GYRO	128
Rys. 41. Wykres błędów MAE estymacji modeli z grupy EstWiel dla danych z ACC i GYRO	129
Rys. 42. Wykres błędów MAE estymacji dla danych z ACC i GYRO modeli MLP, RF i KNN uwzględniających prędkość kątową	130
Rys. 43. Wykresy błędów MAE estymacji modeli EstRegWiel uwzględniających prędkość kątową dla danych z ACC i GYRO (wykres górny pokazuje także Pomiary.ACC.GYRO).....	131
Rys. 44. Stanowisko obrotowe ortometru (w różnych fazach cyklu)	132
Rys. 45. Schemat stanowiska obrotowego ortometru	132
Rys. 46. Wykresy błędów MAE pomiarów z ortometru na obrotowym stanowisku pomiarowym dla różnych prędkości kątowych	134
Rys. 47. Wykresy przedstawiające estymację modeli KNN, RF i MLP.....	139
Rys. 48. Wykres błędów MAE estymacji modeli dla danych pomiarowych z ortometru	140
Rys. 49. Wykres błędów MAE pomiarów z ortometru na obrotowym stanowisku pomiarowym dla różnych prędkości kątowych i grupy modeli uwzględniających prędkość kątową.....	141
Rys. 50. Wykres błędów MAE pomiarów z ortometru na obrotowym stanowisku pomiarowym i grupy najlepszych modeli uwzględniających prędkość kątową	142
Rys. 51. Wykres błędów MAE pomiarów z ortometru na obrotowym stanowisku pomiarowym i grupy najlepszych modeli uwzględniających prędkość kątową – po wykluczeniu najwyższej prędkości kątowej	142
Rys. 52. Wykres błędów MAE pomiarów z ortometru na obrotowym stanowisku pomiarowym i grupy najlepszych modeli uwzględniających uśrednioną prędkość kątową	143

Rys. 53. Wykres błędów MAE pomiarów z ortometru na obrotowym stanowisku pomiarowym i grupy najlepszych modeli uwzględniających uśrednioną prędkość kątową – po wykluczeniu najwyższej prędkości kątowej.....	144
Rys. 54. Stanowisko symulujące ruch ortometru podczas badania.....	144
Rys. 55. Schemat stanowiska pomiarowego drogi.....	145
Rys. 56. Okno aplikacji sterującej stanowiska pomiarowego drogi i kątów.....	146
Rys. 57. Model 3D wzorcowego toru dla stanowiska badawczego pomiaru drogi i kąta rotacji	146
Rys. 58. Parametry wzorcowego toru dla stanowiska badawczego pomiaru drogi [mm] i kąta rotacji [°] w zależności od drogi [mm].....	147
Rys. 59. Wykresy kąta rotacji [°] zmierzonego przez ortometr, kąta toru wzorcowego [°] oraz drogi ramienia [mm] obejmującej dwa cykle ruchu, dla czterech różnych prędkości (górny wykres dla najniższej prędkości, dolny dla najwyższej).	148
Rys. 60. Wykresy uśrednionego kąta rotacji [°] zmierzonego przez ortometr, kąta toru wzorcowego [°] oraz drogi ramienia [mm] obejmującej dwa cykle ruchu, dla czterech różnych prędkości (górny wykres dla najniższej prędkości, dolny dla najwyższej).	149
Rys. 61. Wykresy błędów MAE pomiarów z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji dla różnych prędkości liniowych.....	150
Rys. 62. Wykresy błędów MAE pomiarów z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji dla różnych prędkości liniowych – na odcinkach toru wzorcowego o zmiennym kącie.....	151
Rys. 63. Wykresy błędów MAE pomiarów z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji dla różnych prędkości liniowych – na odcinkach toru wzorcowego o stałym kącie.....	152
Rys. 64. Wykres błędów MAE modeli i pomiarów z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów na całym odcinku toru wzorcowego – pomiary kąta i prędkości kątowej nieuśrednione.....	153

Rys. 65. Wykres błędów MAE modeli i pomiarów z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów na odcinkach toru wzorcowego o zmiennym kącie – pomiary kąta i prędkości kątowej nieuśrednione	154
Rys. 66. Wykres błędów MAE modeli i pomiarów z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów na odcinkach toru wzorcowego o stałym kącie – pomiary kąta i prędkości kątowej nieuśrednione	154
Rys. 67. Wykres błędów MAE modeli i pomiarów z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów na całym odcinku toru wzorcowego – pomiary kąta nieuśrednione, prędkość kątowa uśrednione.....	155
Rys. 68. Wykres błędów MAE modeli i pomiarów z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów na odcinkach toru wzorcowego o zmiennym kącie – pomiary kąta nieuśrednione, prędkość kątowa uśrednione	156
Rys. 69. Wykres błędów MAE modeli i pomiarów z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów na odcinkach toru wzorcowego o stałym kącie – pomiary kąta nieuśrednione, prędkość kątowa uśrednione	157
Rys. 70. Wykresy błędów MAE pomiarów drogi z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji dla różnych prędkości liniowych.....	158
Rys. 71. Wykres błędów MAE pomiarów drogi z ortometru i modelu na stanowisku pomiarowym długości i kątów na całym odcinku toru wzorcowego(wykres z lewej) oraz wykres procentowej poprawy modelu względem pomiarów (wykres z prawej).....	163
Rys. 72. Wizualizacja współpracy badającego z ortometrem i aplikacją komputerową podczas badania	179
Rys. 73. Schemat kręgosłupa człowieka z wyróżnionymi odcinkami oraz symbolami poszczególnych kręgów.....	180
Rys. 74. Formularz ankiety wprowadzania skali Beightona oraz statyki kończyn dolnych	186
Rys. 75. Schemat blokowy drzewa decyzyjnego klasyfikacji do grupy ryzyka wystąpienia skoliozy idiopatycznej.....	188

Rys. 76. Schemat blokowy drzewa decyzyjnego klasyfikacji postawy na bazie krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa.....	189
Rys. 77. Schemat architektury oprogramowania aplikacji ORT.....	195
Rys. 78. Dziedziny zastosowań oprogramowania dla zdrowia. Na podstawie ryciny A.1 normy PN-EN 82304-1	201
Rys. 79. Oznaczenie powierzchni Ortometru.....	205
Rys. 80. Ekran pomiarowy, który wskazuje, że urządzenie jest gotowe do pracy oraz, że została nawiązywana komunikacja bezprzewodowa Bluetooth z aplikacją komputerową.....	205
Rys. 81. Pomiar drogi w pozycji wyprostowanej.....	206
Rys. 82. Pomiar drogi w skłonie.	207
Rys. 83. Model danych zastosowany w aplikacji ORT i powiązania między nimi.	209
Rys. 84. Model – atrybuty klas dostępowych zastosowanych w aplikacji ORT.	209
Rys. 85. Struktura relacyjnej bazy danych odpowiadająca modelowi EntityFramework.....	209
Rys. 86. Okno logowania użytkownika systemu	212
Rys. 87. Konfiguracja programu i scenariuszy badań.....	212
Rys. 88. Okno wyboru rodzaju badania	213
Rys. 89. Okno realizacji oceny płaszczyzny strzałkowej w badaniu przesiewowym.....	213
Rys. 90. Prezentacja wyników pomiarów testu Adamsa - wartości kątów rotacji tułowia w poszczególnych odcinkach kręgosłupa.....	214
Rys. 91. Wizualizacja wyników pomiaru kąta rotacji tułowia na poszczególnych kręgach.....	214
Rys. 92. Ekran modułu wizualizacji kręgosłupa 3D	215
Rys. 93. Przyłożenie ortometru powierzchnią B na wysokości wyrostka kolczystego kręgu C7 (widok z okna aplikacji).	217

Rys. 94. Przesunięcie ortometru wzdłuż pleców pacjenta, przy jednoczesnym utrzymaniu kontaktu rolek z ciałem, obejmuje kolejne etapy pomiaru na różnych poziomach kręgosłupa. Ortometr jest precyzyjnie ustawiany na wysokości wyrostka kolczystego kręgu Th6, następnie przemieszcza się go w dół, aż do poziomu Th12. Proces kontynuuje się, przesuwając ortometr w kierunku dolnej części pleców, aż osiągnie wysokość wyrostka kolczystego L3, a na końcu – S1. Każdy etap zachowuje nieprzerwaną interakcję z ciałem pacjenta, zapewniając precyzyjne pomiary na każdym poziomie kręgosłupa.	218
Rys. 95. Ocena nachylenia miednicy z wykorzystaniem ortometru.	222
Rys. 96. Widok w aplikacji przyłożenia ortometru do pleców badanego podczas oceny kąta lordozy lędźwiowej.	223
Rys. 97. Widok w aplikacji przyłożenia ortometru do pleców badanego podczas oceny kąta kifozy piersiowej.	223
Rys. 98. Widok w aplikacji przyłożenia ortometru do pleców badanego podczas oceny kąta kifozy piersiowej zstępującej.	224
Rys. 99. Wizualizacja scenariusza pomiaru krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa z wykorzystaniem ortometru. Przedstawiono kolejne etapy oceny postawy w płaszczyźnie strzałkowej, obejmujące pomiar nachylenia miednicy, lordozy lędźwiowej oraz kifozy piersiowej (wstępującej i zstępującej).	224
Rys. 100. Wizualizacja etapów pomiarów podczas testu Adamsa.	225
Rys. 101. Ramki z ortometru zebrane podczas badań wprowadzone do arkusza kalkulacyjnego.	226
Rys. 102. Syndrom głowy smsmowej [184].	240
Rys. 103. Wdowi garb [185].	241

Spis tabel

Tabela 1. Publikacje dotyczące analizy obrazów kręgosłupa pochodzących z bazy „SpineWeb” (2019–2021).	34
Tabela 2. Prędkości kątowe obrotowego stanowiska pomiarowego	71
Tabela 3. Statystyki pomiarów kąta wyznaczonego z akcelerometru oraz kąta wzorcowego pogrupowanych według kierunku ruchu	75
Tabela 4. Wielomiany odwrotne wyznaczone dla poszczególnych prędkości kątowych i kierunków ruchu na zbiorze danych surowych	77
Tabela 5. Statystyki pomiarów i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości kątowych większych od zera.....	79
Tabela 6. Statystyki pomiarów i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości kątowych mniejszych od zera.	80
Tabela 7. Statystyki pomiarów i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości kątowych równych zero.	81
Tabela 8. Kolejne iteracje procesu optymalizacji modelu sieci neuronowej	85
Tabela 9. Statystyki modelu sieci neuronowej dla zbiorów walidacyjnych i testowych	87
Tabela 10. Zestaw parametrów architektury sieci neuronowych dla kierunku WZero wraz z wartością funkcji celu.....	88
Tabela 11. Zestaw parametrów wygenerowanych sieci neuronowych dla kierunku MZero wraz z wartością funkcji celu.....	88
Tabela 12. Statystyki modeli sieci neuronowych dla kierunku WZero dla zbiorów walidacyjnych i testowych.....	88
Tabela 13. Statystyki modeli sieci neuronowych dla kierunku MZero dla zbiorów walidacyjnych i testowych.....	88
Tabela 14. Wielomiany odwrotne wyznaczone dla poszczególnych prędkości kątowych na zbiorze danych przefiltrowanych	90

Tabela 15. Statystyki pomiarów i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości kątowych większych od zera - grupy liczące co najmniej 200 próbek.	92
Tabela 16. Statystyki pomiarów i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości kątowych większych od zera - grupy liczące co najmniej 200 próbek.	93
Tabela 17. Statystyki pomiarów i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości kątowych równych zero - grupy liczące co najmniej 200 próbek.	94
Tabela 18. Statystyki pomiarów i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości większych od zera – dodatkowa filtracja fazy rozruchowej.	97
Tabela 19. Statystyki pomiarów i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości większych od zera – dodatkowa filtracja fazy rozruchowej.	98
Tabela 20. Wartości MAE pomiarów, MAE estymacji regresją wielomianową oraz stopień poprawy danych pomiarowych – dla kierunku WZero.	99
Tabela 21. Wartości MAE pomiarów, MAE estymacji regresją wielomianową oraz stopień poprawy danych pomiarowych – dla kierunku MZero.	99
Tabela 22. Statystyki pomiarów kąta na bazie akcelerometru	100
Tabela 23. Statystyki modeli RF, KNN i MLP dla kierunku WZero oraz ich parametry	105
Tabela 24. Statystyki modeli RF, KNN i MLP dla kierunku MZero oraz ich parametry	105
Tabela 25. Statystyki surowych pomiarów kąta na bazie akcelerometru oraz pomiarów uśrednionych.	111
Tabela 26. Wielomiany odwrotne wyznaczone dla poszczególnych prędkości kątowych na zbiorze danych uśrednionych	112
Tabela 27. Statystyki pomiarów i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości większych od zera – uśrednianie pomiarów kąta.	113
Tabela 28. Statystyki pomiarów i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości mniejszych od zera – uśrednianie pomiarów kąta.	114

Tabela 29. Statystyki estymacji oraz stopień poprawy danych pomiarowych dla poszczególnych grup wielomianów odwrotnych wyznaczonych dla kierunku WZero.....	115
Tabela 30. Statystyki estymacji oraz stopień poprawy danych pomiarowych dla poszczególnych grup wielomianów odwrotnych wyznaczonych dla kierunku MZero.....	115
Tabela 31. Statystyki modeli RF, KNN i MLP dla danych uśrednionych i kierunku WZero oraz ich parametry	117
Tabela 32. Statystyki modeli RF, KNN i MLP dla danych uśrednionych i kierunku MZero oraz ich parametry	117
Tabela 33. Statystyki surowych pomiarów kąta na bazie akcelerometru, akcelerometru i żyroskopu oraz pomiarów z akcelerometru uśrednionych.....	124
Tabela 34. Statystyki modeli RF, KNN i MLP dla danych z akcelerometru i żyroskopu w kierunku WZero oraz ich parametry.....	125
Tabela 35. Statystyki modeli RF, KNN i MLP dla danych z akcelerometru i żyroskopu w kierunku MZero oraz ich parametry	126
Tabela 36. Statystyki pomiarów kąta z ortometru na obrotowym stanowisku pomiarowym dla różnych prędkości kątowych	134
Tabela 37. Wielomiany odwrotne wyznaczone dla poszczególnych prędkości kątowych na zbiorze pomiarów z ortometru	135
Tabela 38. Statystyki pomiarów i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości większych od zera – pomiary z ortometru.....	136
Tabela 39. Statystyki pomiarów i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości mniejszych od zera – pomiary z ortometru.....	137
Tabela 40. Statystyki modeli RF, KNN i MLP dla danych z ortometru w kierunku WZero oraz ich parametry	139
Tabela 41. Statystyki modeli RF, KNN i MLP dla danych z ortometru w kierunku MZero oraz ich parametry	139

Tabela 42. Prędkości liniowe na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji kręgosłupa	147
Tabela 43. Statystyki pomiarów kąta z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji dla różnych prędkości kątowych	150
Tabela 44. Statystyki pomiarów kąta z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji dla różnych prędkości liniowych – na odcinkach toru wzorcowego o zmiennym kącie.....	151
Tabela 45. Statystyki pomiarów kąta z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji dla różnych prędkości liniowych – na odcinkach toru wzorcowego o stałym kącie	152
Tabela 46. Statystyki pomiarów drogi z ortometru na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji dla różnych prędkości liniowych.....	158
Tabela 47. Wielomiany odwrotne wyznaczone dla poszczególnych prędkości liniowych na zbiorze pomiarów z ortometru	159
Tabela 48. Statystyki pomiarów drogi i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości liniowych większych od zera – pomiary z ortometru.....	160
Tabela 49. Statystyki pomiarów drogi i estymacji wielomianami odwrotnymi - dla prędkości liniowych mniejszych od zera – pomiary z ortometru.	161
Tabela 50. Wyniki estymacji modelu dla pomiaru drogi z ortometru	162
Tabela 51. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku obrotowym– dla danych surowych akcelerometru	164
Tabela 52. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku obrotowym – dla uśrednionych danych z akcelerometru	165
Tabela 53. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku obrotowym – dla danych z akcelerometru i żyroskopu.....	167
Tabela 54. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku obrotowym ortometru – dla danych nieuśrednionych	168

Tabela 55. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku obrotowym ortometru – prędkość kątowa ograniczona do 28°/s – dla danych nieuśrednionych.....	169
Tabela 56. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku obrotowym ortometru – dla danych uśrednionych.....	170
Tabela 57. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku obrotowym ortometru – prędkość kątowa ograniczona do 28°/s – dla danych uśrednionych	171
Tabela 58. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji - pomiary nieuśrednione, cała długość toru wzorcowego.....	172
Tabela 59. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji - pomiary nieuśrednione, odcinki toru wzorcowego o zmiennym kącie nachylenia	173
Tabela 60. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji - pomiary nieuśrednione, odcinki toru wzorcowego o zmiennym kącie nachylenia, prędkość liniowa do 25mm/s.	174
Tabela 61. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji – uśredniona prędkość kątowa, cała długość toru wzorcowego.....	175
Tabela 62. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji - uśredniona prędkość kątowa, cała długość toru wzorcowego, prędkość liniowa do 25mm/s.	175
Tabela 63. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji – uśredniona prędkość kątowa, odcinki toru wzorcowego o zmiennym kącie nachylenia	177

Tabela 64. Zestawienie najlepszych modeli wg średniego stopnia poprawy MAE na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji – uśredniona prędkość kątowa, odcinki toru wzorcowego o zmiennym kącie nachylenia, prędkość liniowa do 25mm/s.....	177
Tabela 65. Średni stopień poprawy MAE modelu poprawy pomiaru drogi	177
Tabela 66. Przedziały pomiarów drogi na odcinku kręgosłupa C7-S1 i odpowiadające im kręgi	183
Tabela 67. Zakresy norm krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa.....	186
Tabela 68. Reguły eksperckie kwalifikacji do grupy ryzyka wystąpienia skoliozy idiopatycznej	187
Tabela 69. Parametry oceny postawy ciała na bazie krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa.	187
Tabela 70. Wyniki zastosowania metod wyznaczania kąta rotacji tułowia, sumy garbów oraz położenia poszczególnych kręgów	192
Tabela 71. Wyniki pomiaru parametrów krzywizn przednio-tylnych	193
Tabela 72. Wyniki działania drzewa decyzyjnego	193
Tabela 73. Wykaz modułów programowych aplikacji ORT.....	196
Tabela 74. Zdefiniowane założenia projektowe dla aplikacji ORT.	200
Tabela 75. Klasy bezpieczeństwa oprogramowania według normy PN-EN 62304.	202
Tabela 76. Scenariusze badań dostępne w systemie ORT	215
Tabela 77. Fragment definicji etapów scenariusza badania przesiewowego.	216
Tabela 78. Użytkowa prędkość liniowa ortometru - średnia arytmetyczna prędkości chwilowych	228
Tabela 79. Użytkowa prędkość liniowa ortometru - długość odcinka do czasu trwania pomiaru	229
Tabela 80. Średnia prędkość kątowa podczas faz pomiaru ortometrem kąta rotacji tułowia	229

Tabela 81. Średnie zakresy prędkości kątowych podczas faz pomiaru ortometrem kąta rotacji tułowia	229
Tabela 82. Średnie położenie punktów charakterystycznych odpowiadających kręgom T6, T12 i L3 w poszczególnych fazach.	230
Tabela 83. Odchylenie standardowe średniego procentowego położenia punktów charakterystycznych odpowiadającym kręgom T6, T12 i L3 w poszczególnych fazach.	230
Tabela 84. Wartości minimalne i maksymalne położenia punktów charakterystycznych odpowiadającym kręgom T6, T12 i L3 w poszczególnych fazach.	231
Tabela 85. Statystyka błędów MAE dla estymowanych wartości położenia punktów charakterystycznych	231
Tabela 86. Statystyka średnich błędów względnych dla estymowanych wartości położenia punktów charakterystycznych	232
Tabela 87. Wyniki działania drzewa decyzyjnego wyznaczającego grupy ryzyka wystąpienia skoliozy oraz oceny postawy	233
Tabela 88 Wybrane dokumenty wymagane w ocenie zgodności wyrobu System ORT-100, w skład którego wchodzi urządzenie Ortometr oraz aplikacja ORT. W opisach pod pojęciem wyrób/produkt rozumiany jest system ORT-100.	237
Tabela 89. Wyniki estymacji modeli dla danych surowych z akcelerometru	284
Tabela 90. Wyniki estymacji modeli dla danych uśrednionych z akcelerometru	288
Tabela 91. Wyniki estymacji dla danych z ACC i GYRO i modeli powstałych na bazie ACC i GYRO	293
Tabela 92. Wyniki estymacji modeli dla pomiarów z ortometru	298
Tabela 93. Wyniki estymacji dla uśrednionych pomiarów prędkości kątowej modeli wyznaczonych na stanowisku obrotowym ortometru	301

Tabela 94. Wyniki estymacji modeli na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji, na całym odcinku toru wzorcowego – pomiary kąta i prędkości kątowej nieuśrednione....	303
Tabela 95. Wyniki estymacji modeli na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji, na odcinkach toru wzorcowego o zmiennym kącie – pomiary kąta i prędkości kątowej nieuśrednione.....	305
Tabela 96. Wyniki estymacji modeli na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji, na odcinkach toru wzorcowego o stałym kącie – pomiary kąta i prędkości kątowej nieuśrednione.....	307
Tabela 97. Wyniki estymacji modeli na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji, na całym odcinku toru wzorcowego – pomiary kąta nieuśrednione, prędkość kątowa uśrednione.....	309
Tabela 98. Wyniki estymacji modeli na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji, na odcinkach toru wzorcowego o zmiennym kącie – pomiary kąta nieuśrednione, prędkość kątowa uśrednione	311
Tabela 99. Wyniki estymacji modeli na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji, na odcinkach toru wzorcowego o stałym kącie – pomiary kąta nieuśrednione, prędkość kątowa uśrednione	313
Tabela 100. Średnie prędkości liniowe ortometru podczas badań w ośrodku rehabilitacji	315
Tabela 101. Średnie prędkości kątowe ortometru podczas badań w ośrodku rehabilitacji.....	317
Tabela 102. Pomiary długości kręgosłupa wraz z położeniami punktów charakterystycznych wzorcowych i estymowanych.....	318

Spis załączników

Załącznik 1. Nagroda w konkursie Innowator Śląska od Polskiej Izby Rzeczników Patentowych.....	282
Załącznik 2. Nagroda Naczelnej Izby Lekarskiej w konkursie Przychodnia Przyszłości.....	283

Spis publikacji i udział autora w projektach

Publikacje

1. Kluszczyński M, Sobotnicki A, Sobotnicka E, Feige D, Michnik A, Sobiech M, Nowak G., Karpel I. „Model badania postawy ciała AFA-B z wykorzystaniem przyrządu Orthometr MK w ocenie ryzyka rozwoju skoliozy idiopatycznej u dzieci i młodzieży”. W: Taratuta A, Antonowicz M, Lisoń-Kubica J, Rynkus B, Orłowska A, redaktorzy. „Standaryzacja, kompleksowość i spersonalizowane metody leczenia wad rozwojowych i schorzeń u dzieci”. Konferencja naukowa, Chorzów 2024. Zabrze: J&L Leszek Żochowski; 2024. p. 141–148.
2. Karpel I., Ziębiński A., Kluszczyński M., Feige D.: „A Survey of Methods and Technologies Used for Diagnosis of Scoliosis”. *Sensors* 2021, 21, 8410. <https://doi.org/10.3390/s21248410>
3. Feige D., Sobotnicka E., Michnik A., Sobiech A., Kluszczyński M.: „Visualization Of Angle Trunk Rotation Measurements”, Conference on Innovations in Biomedical Engineering – IiBE'2020, October 08-09, 2020, Gliwice, Poland.
4. Trybek P., Sobotnicka E., Wawrzekiewicz-Jałowicka A., Machura Ł., Feige D., Sobotnicki A., Richter-Laskowska M.: „A New Method of Identifying Characteristic Points in the Impedance Cardiography Signal Based on Empirical Mode Decomposition”. *Sensors*, 2023, 23, 675. <https://doi.org/10.3390/s23020675>
5. Karpel I., Olesz K., Mysiński M., Urzeniczok M., Feige D., Palus M., Sobotnicki A., Czerw M.: „The use of an inductive sensor in the assesment of respiratory system performance during exercise – preliminary study”, 30th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems MIXDES'2023, 29-30 June, 2023, Kraków, Poland, pp.277-282. <https://doi.org/10.23919/MIXDES58562.2023.10203257>
6. Karpel I., Wołoszyn J., Olesz K., Mysiński M., Urzeniczok M., Zieliński M., Głowacki S., Feige D., Sobotnicki A., Czerw M.: „EnviroPulmoGuard ICT System for Interactive Health Monitoring – Preliminary Study”, 29th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems MIXDES'2022, 1-6, June 23-24 2022, Wrocław, Poland, pp. 237-242, <https://doi.org/10.23919/MIXDES55591.2022.9838062>
7. Karpel I., Wołoszyn J., Olesz K., Mysiński M., Urzeniczok M., Feige D., Sobotnicki A., Czerw M.: „Comparison of the Effectiveness of the Methods of Recording Physiological Signals Using Passive Electronic Sensors to Obtain Respiratory Parameters in People with Respiratory Dysfunction”, 28th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems MIXDES'2021, June 24-26, 2021, Łódź, Poland, pp. 231-237, <https://doi.org/10.23919/MIXDES52406.2021.9497647>
8. Sobotnicka E., Feige D.: „Real-Time Plotting of Biomedical Signals in Applications Utilizing Windows Presentation Foundation Technology”. *The Polish Journal of Aviation Medicine, Bioengineering and Psychology*, Volume 26(1). <https://doi.org/10.13174/pjambp.24.04.2023.05>
9. Karpel I., Richter-Laskowska M., Feige D., Gacek A., Sobotnicki A.: „An effective method of detecting characteristic points of impedance cardiogram verified in the clinical pilot study”, *Sensors*, 2022, 22, 9872. pp. 1-18, <https://doi.org/10.3390/s22249872>

10. Sobotnicka E., Feige D., Sobotnicki A., Gacek A.: „Telemonitoring of biomedical parameters - technological aspects and applications”, The Polish Journal of Aviation Medicine, Bioengineering and Psychology, 2019, Vol. 25(1), pp. 2543-7186, <https://doi.org/10.13174/pjambp.07.12.2020.04>
11. Feige D., Woźnica T., Skibniewski F., Rózanowski K., Bednarz K., Hein S., Stankiewicz A., Modernizacja systemu monitorowania badań pilotów na wirówce przeciążeniowej, Komitet Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej PAN; Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna, red. R. Będziński, 2007,
12. Stankiewicz A., Czerw M., Feige D., Hein S., Kupka T., System monitorowania wysycenia tlenem hemoglobiny oraz częstości tętna u noworodków z wykorzystaniem pulsoksymonitorów cyfrowych, Komitet Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej PAN; Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna, red. R. Będziński, 2007,
13. Madziara W., Hein S., Feige D., Model systemu wspierającego prowadzenie terapii w onkologii dziecięcej”, Komitet Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej PAN; Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna, red. R. Będziński, 2007, 157.1-157.5
14. Widera A., Feige D., Gacek A., Stankiewicz A., Hein S., Metoda oczyszczania danych w oparciu o mechanizm skierowanego grafu przekształceń na sekwencjach krotek, Proc. XIV KBIB 2005 Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna, pp.473-478.
15. Stankiewicz A. , Czerw M. , Feige D. , Widera A. , Hein S., Monitoring of Vital Signals: The Design Of Pulse Oximetry System Based On Embeded PC Module, Journal of Medical Informatics and Technologies, 2005, Vol.9 pp.113-119.
16. Widera A., Feige D., Stankiewicz A., Domańska J., Jeżewski M., System oczyszczania danych, przygotowania danych dla algorytmów odkrywania wiedzy i migracji schematów, Bazy danych Modele, technologie, narzędzia - Analiza danych i wybrane zastosowania, WKiŁ, 2005, pp.35-42.
17. Stankiewicz A. Czerw M. Feige D. Widera A. Hein S., System ciągłego monitorowania nasycenia tlenem krwi tętniczej, Systemy czasu rzeczywistego - Projektowanie i aplikacje, WKiŁ, 2005, pp.225-234.
18. Widera A., Widera M., Feige D., Horoba K., Stankiewicz A., Data Cleaning Of Medical Data Sets, Journal of Medical Informatics and Technologies, 2004, Vol.8, pp.129.

Udział w projektach

- Projekt celowy Centrum Łukasiewicz - "Tekstroniczny system nadzoru pacjentów z niewydolnością oddechową, sercowo-naczyniową oraz schorzeniami powiązanymi (CardioGuard)",
- Projekt celowy Centrum Łukasiewicz - CŁ/0630/2021/DF/DW „Urządzenie do optymalizacji parametrów ablacji tkanek metodą nieodwracalnej elektroporacji w zastosowaniach onkologicznych (OnkoABL)",
- Projekt NCBiR DOB-BIO-12-05-001-2022 „Opracowanie systemu oceny zdolności personelu latającego do służby w powietrzu na podstawie rejestracji parametrów układu krążenia podczas lotów oraz w warunkach symulowanego oddziaływania przeciążeń (SymuLBNP)",
- Projekt celowy Centrum Łukasiewicz - CŁ/0630/2021/DF/DW „Urządzenie do optymalizacji parametrów ablacji tkanek metodą nieodwracalnej elektroporacji w zastosowaniach onkologicznych (OnkoABL)",

- Projekt STRATEGMED3/305274/8/NCBR/2017, „Nowy model opieki medycznej z wykorzystaniem nowoczesnych metod nieinwazyjnej oceny klinicznej i telemedycyny u chorych z niewydolnością serca – (AMULET)”,
- Projekt POIR (NCBR, Projekty Aplikacyjne), POIR.04.01.04-00-0060/19: EnviroPulmoGuard „Teleinformatyczny system interaktywnego monitorowania stanu zdrowia osób z chorobami układu oddechowego, w warunkach lokalnego środowiska, umożliwiający wczesną prewencję i spersonalizowaną terapię”, konstruktor-informatyk, 2019-2022.
- projekt POIR (NCBR, Projekty Aplikacyjne), POIR.04.01.04-00-0046/17: NeuroPlay - Opracowanie intuicyjnego, przenośnego urządzenia treningowego, bazującego na metodzie biofeedback, ukierunkowanej na wspieranie funkcjonowania poznawczego w procesie starzenia się, konstruktor informatyk, 2018-2021,
- "System do przeprowadzania badań wad postawy ciała oraz pomiarów kątowych zakresu ruchu stawów obwodowych kończyn górnych i dolnych" - podzadanie prowadzonego w Ośrodku Rehabilitacji Leczniczej „Troniny” projektu „Rozwój kompleksowego programu profilaktyki i leczenia wad postawy dzieci i młodzieży z wykorzystaniem innowacyjnych urządzeń do diagnostyki i leczenia wad postawy” w ramach programu RPO Województwa Śląskiego 2014-2020 (nr projektu RPSL.01.02.00-24-064B/16-00),
- "Opracowanie oprogramowania PC do sterowania systemem obudów ścianowych wraz z wizualizacją geometrii sekcji i ściany" – podzadanie prowadzonego w firmie DOH-Bytom projektu „Innowacyjny system elektrohydraulicznego sterowania obudowy zmechanizowanej”, konstruktor-programista, 2017-2018,
- projekt w ramach programu „LIDER” LIDER/03/47/L-1/09/NCBiR/2010 „Opracowanie systemu planowania i wspomagania małoinwazyjnych zabiegów chirurgicznych, lokalizacji, diagnostyki i niszczenia pierwotnych i przerzutowych guzów nowotworowych w wątrobie”. konstruktor-programista, 2010-2013,
- projekt Inicjatywa Technologiczna I nr 13294, „Opracowanie metod i technologii zdalnego dostępu zapewniających integrację aparatów diagnostycznych i komputerowych systemów medycznych ze szpitalnymi systemami informatycznymi”, konstruktor-programista, 2008-2010,
- projekt badawczy rozwojowy R13 030 02, „System wspomagania leczenia kompleksowego w onkologii dziecięcej”, konstruktor-programista, 2007-2010,
- projekt celowy 6T11 2003/C 06126, „Nieinwazyjny pulsoksymonitor skutecznie działający w warunkach niskiej perfuzji oraz zakłóceń ruchowych. PxOM 300”, rola: konstruktor-programista,
- projekt celowy zamawiany - PZC 11-22, „Krajowy system rejestracji i kontroli chorych poddawanych różnym formom elektroterapii serca”, rola: konstruktor-programista.

Załączniki

Załącznik 1. Nagroda w konkursie Innowator Śląska od Polskiej Izby Rzeczników Patentowych



POLSKA IZBA RZECZNIKÓW PATENTOWYCH

**XIV edycja konkursu
INNOWATOR ŚLASKA 2022**

organizowana przez
Górnośląski Akcelerator Przedsiębiorczości Rynkowej sp. z o.o. z siedzibą w Gliwicach
w ramach realizacji projektu „Enterprise Europe Network”

NAGRODA SPECJALNA

od Polskiej Izby Rzeczników Patentowych

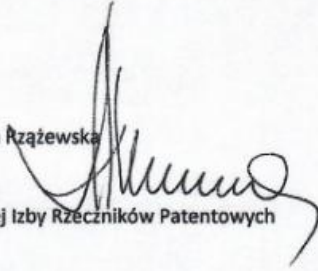
dla:

Ośrodka Rehabilitacji Leczniczej Troniny sp z o.o.

za Model kompleksowej opieki ortopedyczno-rehabilitacyjnej nad dzieckiem zagrożonym wadą postawy i skoliozą z wykorzystaniem dwóch innowacyjnych urządzeń tj. systemu do diagnostyki ortopedycznej „Orthometr” oraz urządzenia do leczenia schorzeń kręgosłupa – grawitacyjnego korektora skolioz „GraviSpine”

Dorota Rządewska

Prezes
Polskiej Izby Rzeczników Patentowych





Górnośląski
Akcelerator
Przedsiębiorczości
Rynkowej sp. z o.o.





nil in
Sieć Lekarzy Innowatorów



**NACZELNA
IZBA LEKARSKA**

Konkurs Przychodnia Przyszłości

Sieci Lekarzy Innowatorów Naczelnej Izby Lekarskiej

Laureat w kategorii
Wdrożenie technologii
lub wyrobu medycznego

marek kluszczyński

Ośrodek Rehabilitacji Leczniczej Troniny Sp z o.o.
Troniny 5, 42-165 Danków

Innowacja
„System diagnostyczny do oceny postawy ciała
i pomiarów ortopedycznych – Orthometr”

Łukasz Jankowski
Prezes Naczelnej Rady Lekarskiej

**nil in
summit**
I Kongres Lekarzy Innowatorów

Tabela 89. Wyniki estymacji modeli dla danych surowych z akcelerometru

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
EstANN12	80163	7,537	12,023	28,200	61,595	-71,271	-0,470	1,75134	42,79754	6,54198	0,93868	12
	132406	7,590	12,701	27,425	61,595	-71,271	-0,372	1,16145	27,19195	5,21459	0,96059	13
	184540	7,812	11,989	26,381	61,594	-71,208	-0,052	0,26561	3,36067	1,83321	0,99511	14
	68419	7,698	8,182	27,379	45,088	-56,680	-0,008	0,25851	0,09297	0,30491	0,99988	15
	61472	8,694	12,352	29,237	45,091	-45,088	0,001	0,50822	0,35510	0,59591	0,99959	16
	50021	8,705	10,904	29,994	45,103	-45,088	0,003	0,60789	0,56699	0,75299	0,99937	17
	39874	9,247	11,775	31,439	45,127	-45,137	0,004	0,76409	1,08049	1,03947	0,99891	18
	29247	9,917	11,713	33,703	45,103	-45,159	-0,016	0,95946	2,69514	1,64169	0,99765	19
	23693	10,454	5,387	35,706	45,137	-45,116	-0,040	0,86267	4,60241	2,14532	0,99644	20
EstANN13	80163	7,602	12,010	28,189	61,595	-71,271	-0,405	1,80105	42,81670	6,54345	0,93865	12
	132406	7,658	12,812	27,412	61,595	-71,271	-0,305	1,11240	27,18405	5,21383	0,96060	13
	184540	7,885	11,966	26,367	61,594	-71,208	0,022	0,22769	3,34806	1,82977	0,99513	14
	68419	7,770	8,159	27,365	45,163	-56,680	0,064	0,23792	0,07501	0,27388	0,99990	15
	61472	8,766	12,383	29,225	45,167	-45,109	0,072	0,48844	0,31632	0,56242	0,99963	16
	50021	8,775	10,860	29,984	45,182	-45,103	0,074	0,59324	0,52102	0,72182	0,99942	17
	39874	9,316	11,733	31,428	45,224	-45,164	0,074	0,75584	1,02050	1,01020	0,99897	18
	29247	9,986	11,659	33,693	45,182	-45,131	0,053	0,96410	2,62501	1,62019	0,99771	19
	23693	10,521	5,517	35,695	45,253	-45,109	0,027	0,87948	4,54726	2,13243	0,99648	20
EstANN14	80163	7,547	12,018	28,186	61,595	-71,271	-0,460	1,84702	42,84320	6,54547	0,93861	12
	132406	7,599	12,761	27,416	61,595	-71,271	-0,363	1,18320	27,20986	5,21631	0,96056	13
	184540	7,825	11,911	26,369	61,594	-71,208	-0,039	0,18336	3,34391	1,82864	0,99514	14
	68419	7,703	8,070	27,362	45,063	-56,680	-0,003	0,19899	0,05208	0,22820	0,99993	15
	61472	8,698	12,288	29,225	45,063	-45,440	0,004	0,45354	0,24893	0,49893	0,99971	16
	50021	8,704	10,843	29,984	45,063	-45,420	0,003	0,56909	0,43799	0,66181	0,99952	17
	39874	9,241	11,769	31,426	45,063	-45,681	-0,001	0,74558	0,91278	0,95539	0,99908	18
	29247	9,905	11,698	33,690	45,063	-45,523	-0,028	0,98475	2,49291	1,57890	0,99783	19
	23693	10,434	5,524	35,690	45,063	-45,440	-0,060	0,92342	4,43962	2,10704	0,99657	20
EstANN15	80163	7,540	12,104	28,176	61,595	-71,271	-0,466	1,99437	42,95071	6,55368	0,93846	12
	132406	7,593	12,705	27,405	61,595	-71,271	-0,370	1,33504	27,29238	5,22421	0,96044	13
	184540	7,818	11,880	26,364	61,594	-71,208	-0,046	0,33309	3,38334	1,83939	0,99508	14
	68419	7,692	8,058	27,336	45,041	-56,680	-0,014	0,08882	0,03651	0,19107	0,99995	15
	61472	8,688	12,304	29,207	45,041	-45,135	-0,006	0,33730	0,13436	0,36655	0,99984	16
	50021	8,693	10,831	29,963	45,041	-45,133	-0,009	0,47095	0,28256	0,53157	0,99969	17
	39874	9,227	11,599	31,395	45,041	-45,150	-0,016	0,67168	0,69414	0,83315	0,99930	18
	29247	9,889	11,837	33,652	45,035	-45,141	-0,044	0,95147	2,19699	1,48222	0,99809	19
	23693	10,415	5,720	35,639	45,036	-45,135	-0,079	0,92816	4,17849	2,04414	0,99677	20
EstANN16	80163	7,516	12,128	28,165	61,595	-71,271	-0,491	2,30034	43,33587	6,58300	0,93791	12
	132406	7,564	12,623	27,393	61,595	-71,271	-0,399	1,65821	27,64499	5,25785	0,95993	13
	184540	7,793	11,927	26,361	61,594	-71,208	-0,070	0,68719	3,66634	1,91477	0,99467	14
	68419	7,648	8,047	27,311	45,005	-56,680	-0,058	0,37282	0,16923	0,41137	0,99977	15
	61472	8,647	12,228	29,202	45,000	-45,052	-0,047	0,12419	0,05950	0,24393	0,99993	16
	50021	8,646	10,757	29,961	45,005	-45,052	-0,055	0,27931	0,10843	0,32928	0,99988	17

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
	39874	9,172	11,670	31,384	45,005	-45,052	-0,070	0,52849	0,37084	0,60897	0,99963	18
	29247	9,817	11,455	33,635	45,004	-45,052	-0,116	0,89801	1,68132	1,29666	0,99854	19
	23693	10,332	6,082	35,614	45,005	-45,051	-0,161	0,94734	3,69853	1,92316	0,99714	20
EstANNRaw	80163	7,989	12,703	28,149	61,595	-71,271	-0,018	2,11666	43,09963	6,56503	0,93824	12
	132406	8,086	13,152	27,365	61,595	-71,271	0,123	1,47172	27,45811	5,24005	0,96020	13
	184540	8,367	12,766	26,340	61,594	-71,208	0,504	0,68367	3,78399	1,94525	0,99450	14
	68419	8,176	8,603	27,238	45,000	-56,680	0,470	0,55332	0,54210	0,73627	0,99928	15
	61472	9,152	12,911	29,082	45,000	-45,000	0,458	0,74199	0,89996	0,94866	0,99895	16
	50021	9,120	11,661	29,796	45,000	-45,000	0,419	0,84407	1,12251	1,05949	0,99876	17
	39874	9,612	12,196	31,203	45,000	-45,000	0,369	1,01749	1,69133	1,30051	0,99830	18
	29247	10,208	11,994	33,422	45,000	-45,000	0,275	1,20158	3,20746	1,79094	0,99721	19
	23693	10,658	6,141	35,374	45,000	-45,000	0,164	1,12915	4,95948	2,22699	0,99616	20
EstWiel12	80163	8,008	14,218	26,420	45,341	-45,277	0,002	0,20391	0,06637	0,25762	0,99990	12
	132406	7,888	14,042	26,282	45,248	-45,416	-0,074	0,15299	0,04423	0,21031	0,99994	13
	184540	7,839	11,910	26,234	45,320	-45,395	-0,025	0,14212	0,02672	0,16345	0,99996	14
	68419	7,700	8,042	27,390	45,310	-45,352	-0,006	0,28819	0,09003	0,30005	0,99988	15
	61472	8,697	12,329	29,249	45,320	-45,362	0,004	0,54038	0,35409	0,59506	0,99959	16
	50021	8,709	10,762	30,012	45,361	-45,352	0,007	0,64894	0,56711	0,75307	0,99937	17
	39874	9,252	11,534	31,459	45,495	-45,480	0,010	0,81558	1,07910	1,03880	0,99891	18
	29247	9,925	11,463	33,730	45,361	-45,405	-0,008	1,03088	2,70748	1,64544	0,99764	19
	23693	10,464	5,382	35,738	45,628	-45,362	-0,029	0,95443	4,62912	2,15154	0,99642	20
EstWiel13	80163	8,075	14,269	26,398	45,344	-45,084	0,068	0,22301	0,08161	0,28567	0,99988	12
	132406	7,958	14,134	26,260	45,256	-45,215	-0,005	0,12888	0,04288	0,20706	0,99994	13
	184540	7,913	11,988	26,214	45,325	-45,195	0,049	0,11305	0,02153	0,14673	0,99997	14
	68419	7,773	8,102	27,357	45,315	-45,154	0,067	0,26140	0,07817	0,27960	0,99990	15
	61472	8,769	12,372	29,218	45,325	-45,164	0,075	0,51535	0,32377	0,56900	0,99962	16
	50021	8,779	10,822	29,976	45,364	-45,154	0,078	0,62743	0,52981	0,72788	0,99941	17
	39874	9,321	11,653	31,419	45,493	-45,275	0,079	0,79872	1,02949	1,01464	0,99896	18
	29247	9,991	11,582	33,681	45,364	-45,205	0,058	1,02349	2,64211	1,62546	0,99770	19
	23693	10,529	5,505	35,682	45,621	-45,164	0,035	0,95387	4,57093	2,13797	0,99646	20
EstWiel14	80163	8,021	14,245	26,407	45,415	-45,234	0,015	0,26596	0,11102	0,33320	0,99984	12
	132406	7,904	14,054	26,270	45,325	-45,365	-0,059	0,19320	0,06940	0,26344	0,99990	13
	184540	7,858	11,930	26,225	45,395	-45,344	-0,006	0,07796	0,01854	0,13617	0,99997	14
	68419	7,718	8,055	27,368	45,385	-45,304	0,012	0,22223	0,05797	0,24076	0,99992	15
	61472	8,715	12,264	29,233	45,395	-45,314	0,022	0,48070	0,25852	0,50845	0,99970	16
	50021	8,726	10,845	29,994	45,435	-45,304	0,025	0,60514	0,44931	0,67030	0,99950	17
	39874	9,268	11,686	31,436	45,563	-45,425	0,026	0,79274	0,92525	0,96190	0,99907	18
	29247	9,939	11,615	33,699	45,435	-45,355	0,006	1,04822	2,51204	1,58494	0,99781	19
	23693	10,477	5,540	35,700	45,692	-45,314	-0,017	1,00554	4,46717	2,11357	0,99654	20
EstWiel15	80163	8,014	14,264	26,399	45,526	-45,407	0,007	0,41432	0,22583	0,47521	0,99968	12
	132406	7,896	13,950	26,262	45,437	-45,537	-0,067	0,35630	0,16414	0,40514	0,99976	13
	184540	7,849	11,923	26,218	45,506	-45,517	-0,014	0,22329	0,06634	0,25756	0,99990	14
	68419	7,708	8,038	27,356	45,496	-45,477	0,002	0,16008	0,07079	0,26606	0,99991	15
	61472	8,706	12,308	29,229	45,506	-45,487	0,013	0,40796	0,18083	0,42524	0,99979	16

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
	50021	8,716	10,767	29,992	45,546	-45,477	0,015	0,55775	0,34011	0,58319	0,99962	17
	39874	9,257	11,578	31,432	45,674	-45,597	0,015	0,77877	0,76520	0,87476	0,99923	18
	29247	9,928	11,802	33,693	45,546	-45,527	-0,005	1,09542	2,29782	1,51586	0,99800	19
	23693	10,465	5,728	35,690	45,802	-45,487	-0,029	1,10629	4,30112	2,07392	0,99667	20
EstWiel16	80163	8,177	14,319	26,413	45,894	-45,407	0,171	0,57753	0,43607	0,66036	0,99938	12
	132406	8,066	14,041	26,278	45,807	-45,537	0,104	0,52689	0,33136	0,57564	0,99952	13
	184540	8,032	12,166	26,233	45,874	-45,517	0,169	0,40629	0,21144	0,45982	0,99969	14
	68419	7,882	8,261	27,374	45,865	-45,477	0,176	0,31703	0,17520	0,41857	0,99977	15
	61472	8,881	12,425	29,256	45,874	-45,487	0,187	0,33669	0,19401	0,44047	0,99977	16
	50021	8,886	10,999	30,025	45,913	-45,477	0,185	0,50064	0,31648	0,56257	0,99965	17
	39874	9,420	11,674	31,465	46,038	-45,597	0,178	0,75542	0,68247	0,82611	0,99931	18
	29247	10,083	11,872	33,735	45,913	-45,527	0,150	1,13272	2,13827	1,46228	0,99814	19
	23693	10,610	6,095	35,733	46,162	-45,487	0,117	1,19272	4,17107	2,04232	0,99677	20
EstWiel17	80163	8,007	14,055	26,443	46,126	-45,975	0,001	0,96349	1,06072	1,02991	0,99848	12
	132406	7,886	13,899	26,310	46,041	-46,099	-0,077	0,93323	0,95263	0,97603	0,99862	13
	184540	7,835	11,942	26,262	46,107	-46,080	-0,028	0,84499	0,73897	0,85964	0,99893	14
	68419	7,698	8,141	27,415	46,098	-46,042	-0,008	0,71619	0,56761	0,75340	0,99924	15
	61472	8,703	12,207	29,315	46,107	-46,051	0,010	0,46474	0,34827	0,59014	0,99959	16
	50021	8,717	10,837	30,100	46,145	-46,042	0,015	0,37940	0,37113	0,60921	0,99959	17
	39874	9,259	11,506	31,540	46,269	-46,156	0,017	0,69224	0,58491	0,76480	0,99941	18
	29247	9,939	11,272	33,822	46,145	-46,089	0,006	1,21182	1,86460	1,36550	0,99838	19
	23693	10,480	6,348	35,822	46,392	-46,051	-0,013	1,38965	3,98409	1,99602	0,99692	20
EstRegWiel	80163	8,061	14,258	26,420	45,129	-45,239	0,055	0,12589	0,02475	0,15733	0,99996	12
	132406	7,941	14,140	26,286	45,035	-45,383	-0,022	0,05579	0,00665	0,08157	0,99999	13
	184540	7,886	11,969	26,236	45,111	-45,360	0,023	0,08572	0,01140	0,10679	0,99998	14
	68419	7,687	8,082	27,412	45,097	-45,316	-0,019	0,08132	0,01079	0,10387	0,99999	15
	61472	8,676	12,199	29,311	45,108	-45,327	-0,017	0,06827	0,00871	0,09331	0,99999	16
	50021	8,682	10,830	30,102	45,150	-45,316	-0,019	0,06803	0,00988	0,09940	0,99999	17
	39874	9,221	11,483	31,572	45,286	-45,449	-0,021	0,08378	0,01363	0,11673	0,99999	18
	29247	9,899	11,130	33,946	45,150	-45,372	-0,034	0,09097	0,03041	0,17438	0,99997	19
	23693	10,453	5,836	36,009	45,422	-45,327	-0,041	0,12849	0,12022	0,34673	0,99991	20
KNNBase.ACC	80163	11,390	21,258	32,991	44,982	-45,178	-3,383	8,05440	194,13173	13,93312	0,72183	12
	132406	11,673	21,321	32,575	44,982	-45,288	-3,711	7,94906	189,66460	13,77188	0,72512	13
	184540	12,492	20,976	31,359	44,982	-45,280	-4,629	7,61501	183,72677	13,55458	0,73285	14
	68419	10,843	7,391	27,931	44,970	-45,436	-3,137	5,17443	105,48035	10,27036	0,85929	15
	61472	6,331	2,920	25,757	44,953	-45,770	2,363	7,60050	200,18999	14,14885	0,76632	16
	50021	6,478	2,920	27,151	44,953	-45,744	2,224	6,81680	175,76055	13,25747	0,80542	17
	39874	7,407	2,920	29,156	44,953	-46,456	1,835	6,03487	152,93927	12,36686	0,84600	18
	29247	8,326	2,920	32,353	44,953	-46,442	1,607	4,61651	113,97285	10,67581	0,90077	19
	23693	9,512	8,903	34,911	44,953	-47,474	0,982	3,27572	77,03117	8,77674	0,94042	20
MLP.ACC	80163	8,064	11,933	26,925	45,000	-45,000	-0,058	1,34525	17,78855	4,21765	0,97451	12
	132406	7,951	12,784	26,561	45,000	-45,000	0,012	0,85554	11,06609	3,32657	0,98396	13
	184540	7,860	11,893	26,243	45,000	-45,000	0,004	0,16195	1,29757	1,13911	0,99811	14
	68419	7,702	8,077	27,298	45,000	-45,000	0,004	0,10898	0,03957	0,19893	0,99995	15

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
	61472	8,690	12,246	29,189	45,000	-45,000	0,004	0,08856	0,03782	0,19447	0,99996	16
	50021	8,694	10,860	29,957	45,000	-45,000	0,008	0,10497	0,04616	0,21484	0,99995	17
	39874	9,233	11,528	31,400	45,000	-45,000	0,010	0,12258	0,05660	0,23790	0,99994	18
	29247	9,927	11,604	33,682	45,000	-45,000	0,006	0,51155	0,66396	0,81484	0,99942	19
	23693	10,412	4,860	35,610	45,000	-45,000	0,082	0,70657	2,38482	1,54428	0,99816	20
RF.ACC	80163	8,055	11,947	26,928	45,000	-45,000	-0,049	1,33904	17,76227	4,21453	0,97455	12
	132406	7,945	12,783	26,559	45,000	-45,000	0,017	0,85765	11,06816	3,32688	0,98396	13
	184540	7,856	11,890	26,230	45,000	-45,000	0,007	0,17339	1,30977	1,14445	0,99810	14
	68419	7,690	8,100	27,261	45,000	-45,000	0,016	0,13895	0,05149	0,22692	0,99993	15
	61472	8,678	12,223	29,151	45,000	-45,000	0,015	0,12869	0,05060	0,22494	0,99994	16
	50021	8,678	10,860	29,911	45,000	-45,000	0,024	0,15415	0,06307	0,25114	0,99993	17
	39874	9,209	11,530	31,338	45,000	-45,000	0,034	0,19707	0,11518	0,33938	0,99988	18
	29247	9,842	7,030	33,656	45,000	-45,000	0,091	0,88628	2,93106	1,71203	0,99745	19
	23693	9,618	1,350	34,664	45,000	-45,000	0,876	2,83243	72,84170	8,53473	0,94366	20

Tabela 90. Wyniki estymacji modeli dla danych uśrednionych z akcelerometru

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
EstANN12	80163	7,98	14,10	26,49	61,46	-70,42	-0,03	0,10010	1,74004	1,31911	0,99751	12
	132406	7,90	13,91	26,28	60,95	-45,17	-0,07	0,09367	0,04525	0,21272	0,99993	13
	184540	7,84	12,08	26,23	45,07	-45,09	-0,02	0,12450	0,02454	0,15665	0,99996	14
	68419	7,70	8,21	27,38	45,07	-45,08	-0,01	0,23715	0,08332	0,28866	0,99989	15
	61472	8,69	12,34	29,19	45,08	-45,08	0,00	0,49054	0,35438	0,59530	0,99958	16
	50021	8,69	11,12	29,90	45,08	-45,08	0,00	0,59341	0,57355	0,75733	0,99936	17
	39874	9,23	11,81	31,33	45,08	-45,09	0,00	0,75798	1,10526	1,05131	0,99888	18
	29247	9,88	11,99	33,45	45,08	-45,09	-0,02	0,99807	2,88202	1,69765	0,99744	19
	23693	10,37	8,71	35,28	45,08	-45,08	-0,05	1,02573	5,57612	2,36138	0,99558	20
EstANN13	80163	8,04	14,20	26,47	61,46	-70,42	0,04	0,16429	1,75481	1,32469	0,99749	12
	132406	7,96	14,09	26,26	60,95	-45,12	0,00	0,02473	0,03273	0,18091	0,99995	13
	184540	7,91	12,06	26,21	45,14	-45,09	0,05	0,08242	0,01026	0,10130	0,99999	14
	68419	7,76	8,15	27,37	45,14	-45,08	0,05	0,21033	0,06146	0,24791	0,99992	15
	61472	8,75	12,37	29,18	45,15	-45,09	0,06	0,46552	0,31118	0,55783	0,99964	16
	50021	8,75	11,05	29,89	45,16	-45,08	0,05	0,57203	0,52215	0,72260	0,99942	17
	39874	9,28	11,74	31,32	45,16	-45,10	0,05	0,74080	1,03931	1,01946	0,99894	18
	29247	9,92	12,00	33,44	45,15	-45,09	0,02	0,98861	2,79422	1,67159	0,99752	19
	23693	10,40	8,75	35,28	45,15	-45,09	-0,01	1,02531	5,49350	2,34382	0,99564	20
EstANN14	80163	7,99	14,16	26,48	61,46	-70,42	-0,02	0,20231	1,76733	1,32941	0,99747	12
	132406	7,91	14,06	26,27	60,95	-45,46	-0,05	0,09750	0,04636	0,21532	0,99993	13
	184540	7,85	12,00	26,22	45,06	-45,38	-0,01	0,02394	0,00245	0,04950	1,00000	14
	68419	7,71	8,11	27,37	45,06	-45,35	0,00	0,15485	0,03180	0,17832	0,99996	15
	61472	8,70	12,34	29,18	45,06	-45,37	0,01	0,41294	0,23609	0,48589	0,99972	16
	50021	8,70	10,95	29,90	45,06	-45,34	0,01	0,52619	0,42887	0,65489	0,99952	17
	39874	9,24	11,59	31,33	45,06	-45,40	0,00	0,70494	0,91796	0,95810	0,99907	18
	29247	9,88	12,02	33,45	45,06	-45,38	-0,02	0,97275	2,63542	1,62340	0,99766	19
	23693	10,37	8,66	35,29	45,06	-45,37	-0,05	1,02429	5,33294	2,30932	0,99577	20
EstANN15	80163	7,98	14,05	26,47	61,46	-70,42	-0,02	0,36331	1,85103	1,36053	0,99735	12
	132406	7,90	14,02	26,27	60,95	-45,14	-0,06	0,26222	0,11318	0,33643	0,99984	13
	184540	7,85	11,96	26,22	45,04	-45,13	-0,02	0,18154	0,03753	0,19372	0,99995	14
	68419	7,70	8,09	27,37	45,04	-45,13	-0,01	0,03239	0,00886	0,09413	0,99999	15
	61472	8,69	12,35	29,18	45,04	-45,13	0,00	0,28491	0,11168	0,33418	0,99987	16
	50021	8,69	11,05	29,90	45,04	-45,13	0,00	0,41219	0,25918	0,50910	0,99971	17
	39874	9,23	11,43	31,32	45,04	-45,13	0,00	0,61009	0,67795	0,82338	0,99931	18
	29247	9,87	12,19	33,45	45,04	-45,13	-0,03	0,91202	2,29122	1,51368	0,99797	19
	23693	10,36	8,44	35,28	45,04	-45,13	-0,06	0,99354	4,96747	2,22878	0,99606	20
EstANN16	80163	7,97	13,99	26,47	61,46	-70,42	-0,04	0,69820	2,21273	1,48753	0,99683	12
	132406	7,89	13,72	26,27	60,95	-45,05	-0,08	0,59940	0,44513	0,66718	0,99935	13
	184540	7,83	11,96	26,22	45,01	-45,05	-0,03	0,53317	0,31363	0,56003	0,99954	14
	68419	7,68	8,07	27,36	45,01	-45,05	-0,03	0,30951	0,12684	0,35615	0,99983	15
	61472	8,67	12,29	29,19	45,01	-45,05	-0,02	0,05222	0,02003	0,14152	0,99998	16
	50021	8,67	10,96	29,91	45,00	-45,05	-0,02	0,19355	0,06135	0,24769	0,99993	17

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
	39874	9,21	11,49	31,33	45,01	-45,05	-0,03	0,42905	0,31774	0,56368	0,99968	18
	29247	9,84	12,03	33,46	45,00	-45,05	-0,06	0,80123	1,68665	1,29871	0,99850	19
	23693	10,33	8,03	35,29	45,00	-45,05	-0,09	0,94251	4,28646	2,07038	0,99660	20
EstANNRaw	80163	8,48	14,81	26,46	61,46	-70,42	0,47	0,57561	2,10355	1,45036	0,99699	12
	132406	8,42	14,48	26,25	60,95	-45,00	0,46	0,46807	0,35864	0,59886	0,99948	13
	184540	8,39	12,86	26,22	45,00	-45,00	0,53	0,53776	0,44249	0,66520	0,99936	14
	68419	8,16	8,67	27,33	45,00	-45,00	0,45	0,49068	0,50677	0,71187	0,99932	15
	61472	9,12	12,92	29,13	45,00	-45,00	0,44	0,67002	0,87434	0,93506	0,99897	16
	50021	9,09	11,72	29,82	45,00	-45,00	0,39	0,76542	1,11664	1,05671	0,99875	17
	39874	9,57	12,37	31,24	45,00	-45,00	0,34	0,91315	1,65442	1,28624	0,99832	18
	29247	10,11	12,33	33,34	45,00	-45,00	0,21	1,13995	3,46592	1,86170	0,99693	19
	23693	10,52	9,50	35,16	45,00	-45,00	0,10	1,15973	6,15643	2,48122	0,99512	20
EstWiel12	80163	8,01	14,22	26,42	45,28	-45,24	0,01	0,11833	0,01971	0,14038	0,99997	12
	132406	7,89	14,06	26,28	45,20	-45,38	-0,07	0,08179	0,01075	0,10370	0,99998	13
	184540	7,84	11,99	26,23	45,26	-45,33	-0,02	0,12442	0,01899	0,13782	0,99997	14
	68419	7,71	8,06	27,39	45,26	-45,31	0,00	0,25519	0,07858	0,28033	0,99990	15
	61472	8,70	12,24	29,19	45,28	-45,32	0,01	0,51386	0,34667	0,58879	0,99959	16
	50021	8,71	10,93	29,91	45,29	-45,31	0,02	0,62303	0,56572	0,75214	0,99937	17
	39874	9,25	11,65	31,34	45,29	-45,34	0,02	0,79572	1,09726	1,04750	0,99889	18
	29247	9,91	11,80	33,46	45,28	-45,33	0,01	1,04514	2,87489	1,69555	0,99745	19
	23693	10,41	8,64	35,31	45,29	-45,32	-0,01	1,08786	5,58445	2,36314	0,99557	20
EstWiel13	80163	8,08	14,27	26,40	45,29	-45,05	0,07	0,13527	0,02785	0,16690	0,99996	12
	132406	7,96	14,15	26,26	45,21	-45,18	0,00	0,04536	0,00464	0,06809	0,99999	13
	184540	7,91	12,03	26,21	45,27	-45,14	0,05	0,09143	0,01247	0,11166	0,99998	14
	68419	7,77	8,13	27,37	45,27	-45,11	0,06	0,22688	0,06441	0,25379	0,99991	15
	61472	8,76	12,36	29,18	45,28	-45,13	0,07	0,48665	0,31272	0,55921	0,99963	16
	50021	8,77	10,99	29,89	45,30	-45,11	0,07	0,59916	0,52376	0,72371	0,99942	17
	39874	9,30	11,68	31,33	45,30	-45,14	0,07	0,77549	1,04124	1,02041	0,99894	18
	29247	9,95	11,92	33,45	45,29	-45,13	0,05	1,03249	2,79808	1,67275	0,99752	19
	23693	10,44	8,75	35,29	45,30	-45,13	0,02	1,08129	5,50219	2,34568	0,99563	20
EstWiel14	80163	8,03	14,20	26,41	45,36	-45,20	0,02	0,16053	0,04079	0,20195	0,99994	12
	132406	7,91	14,06	26,27	45,28	-45,33	-0,06	0,11170	0,01889	0,13743	0,99997	13
	184540	7,86	11,95	26,22	45,34	-45,29	-0,01	0,04355	0,00506	0,07115	0,99999	14
	68419	7,72	8,07	27,38	45,34	-45,26	0,01	0,16307	0,03507	0,18727	0,99995	15
	61472	8,71	12,35	29,19	45,35	-45,28	0,02	0,42348	0,23626	0,48606	0,99972	16
	50021	8,71	10,92	29,91	45,37	-45,26	0,02	0,54144	0,42828	0,65443	0,99952	17
	39874	9,25	11,55	31,34	45,37	-45,29	0,02	0,72642	0,91666	0,95743	0,99907	18
	29247	9,90	11,95	33,46	45,36	-45,28	0,00	0,99956	2,63288	1,62261	0,99767	19
	23693	10,39	8,63	35,30	45,37	-45,28	-0,03	1,06171	5,33417	2,30958	0,99577	20
EstWiel15	80163	8,02	14,37	26,41	45,47	-45,38	0,01	0,30920	0,12355	0,35149	0,99982	12
	132406	7,90	14,04	26,27	45,39	-45,50	-0,06	0,27370	0,08826	0,29708	0,99987	13
	184540	7,85	11,92	26,22	45,45	-45,46	-0,01	0,18575	0,04160	0,20396	0,99994	14
	68419	7,71	8,08	27,37	45,45	-45,44	0,00	0,06509	0,02176	0,14750	0,99997	15
	61472	8,70	12,31	29,19	45,46	-45,45	0,01	0,31374	0,12696	0,35631	0,99985	16

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
	50021	8,71	10,99	29,92	45,48	-45,43	0,01	0,44772	0,27805	0,52730	0,99969	17
	39874	9,24	11,41	31,35	45,48	-45,47	0,01	0,65446	0,70173	0,83769	0,99929	18
	29247	9,89	12,14	33,47	45,47	-45,45	-0,01	0,96963	2,32682	1,52539	0,99794	19
	23693	10,38	8,44	35,32	45,48	-45,45	-0,03	1,06657	5,01448	2,23930	0,99602	20
EstWiel16	80163	8,19	14,52	26,42	45,84	-45,38	0,18	0,47776	0,30707	0,55414	0,99956	12
	132406	8,07	14,34	26,28	45,76	-45,50	0,11	0,44451	0,23267	0,48236	0,99966	13
	184540	8,03	12,11	26,23	45,82	-45,46	0,16	0,36149	0,17326	0,41624	0,99975	14
	68419	7,86	8,34	27,38	45,82	-45,44	0,15	0,20291	0,09075	0,30124	0,99988	15
	61472	8,85	12,45	29,21	45,83	-45,45	0,16	0,20752	0,09821	0,31338	0,99988	16
	50021	8,84	11,12	29,93	45,85	-45,43	0,15	0,35192	0,20091	0,44823	0,99978	17
	39874	9,37	11,64	31,36	45,85	-45,47	0,14	0,58016	0,54829	0,74046	0,99944	18
	29247	9,99	12,44	33,50	45,84	-45,45	0,09	0,93534	2,05558	1,43373	0,99818	19
	23693	10,47	8,44	35,34	45,85	-45,45	0,05	1,06704	4,70353	2,16876	0,99627	20
EstWiel17	80163	8,01	14,05	26,44	46,07	-45,95	0,00	0,88021	0,88277	0,93956	0,99874	12
	132406	7,89	13,92	26,31	46,00	-46,06	-0,07	0,85227	0,80633	0,89796	0,99883	13
	184540	7,84	12,02	26,25	46,05	-46,02	-0,03	0,78396	0,66619	0,81620	0,99903	14
	68419	7,69	8,10	27,41	46,05	-46,00	-0,02	0,55354	0,39185	0,62598	0,99948	15
	61472	8,69	12,29	29,25	46,07	-46,01	0,00	0,28082	0,14708	0,38352	0,99983	16
	50021	8,70	10,83	29,99	46,08	-46,00	0,01	0,13886	0,12035	0,34691	0,99987	17
	39874	9,24	11,71	31,42	46,08	-46,03	0,01	0,40640	0,27379	0,52325	0,99972	18
	29247	9,89	11,84	33,56	46,07	-46,02	-0,01	0,85746	1,50078	1,22506	0,99867	19
	23693	10,39	7,76	35,41	46,08	-46,01	-0,03	1,06856	4,06977	2,01737	0,99677	20
EstRegWiel	80163	7,95	14,17	26,44	45,07	-45,21	-0,05	0,12274	0,02428	0,15582	0,99997	12
	132406	7,88	14,06	26,29	45,03	-45,36	-0,08	0,08783	0,01209	0,10995	0,99998	13
	184540	7,90	12,02	26,23	45,06	-45,30	0,03	0,07038	0,00814	0,09022	0,99999	14
	68419	7,69	8,09	27,41	45,05	-45,28	-0,02	0,04082	0,00485	0,06962	0,99999	15
	61472	8,67	12,27	29,24	45,06	-45,29	-0,02	0,04993	0,00573	0,07572	0,99999	16
	50021	8,68	10,81	29,98	45,09	-45,27	-0,02	0,04384	0,00628	0,07925	0,99999	17
	39874	9,21	11,69	31,43	45,08	-45,30	-0,02	0,05245	0,00864	0,09293	0,99999	18
	29247	9,87	11,94	33,63	45,07	-45,29	-0,03	0,08550	0,01769	0,13299	0,99998	19
	23693	10,40	7,81	35,54	45,08	-45,29	-0,02	0,14436	0,06591	0,25673	0,99995	20
EstRegWielORT	80163	8,03	14,24	26,40	45,14	-44,95	0,02	0,11315	0,01847	0,13591	0,99997	12
	132406	7,93	14,12	26,26	45,16	-45,17	-0,04	0,06250	0,00561	0,07488	0,99999	13
	184540	7,88	11,99	26,22	45,18	-45,07	0,02	0,05851	0,00506	0,07113	0,99999	14
	68419	7,71	8,10	27,36	45,18	-45,05	0,00	0,03500	0,00176	0,04196	1,00000	15
	61472	8,70	12,27	29,19	45,16	-45,01	0,01	0,04063	0,00218	0,04668	1,00000	16
	50021	8,70	10,81	29,93	45,15	-45,00	0,01	0,02885	0,00163	0,04035	1,00000	17
	39874	9,25	11,69	31,36	45,08	-45,03	0,01	0,03050	0,00247	0,04971	1,00000	18
	29247	9,91	11,94	33,54	45,02	-45,02	0,01	0,06077	0,00977	0,09885	0,99999	19
	23693	10,45	7,81	35,43	45,03	-45,02	0,03	0,10652	0,05632	0,23731	0,99996	20
EstRegWielSred	80163	8,02	14,23	26,41	45,09	-45,06	0,01	0,10921	0,01752	0,13237	0,99997	12
	132406	7,95	14,16	26,26	45,09	-45,23	-0,01	0,04693	0,00353	0,05937	0,99999	13
	184540	7,85	11,96	26,22	45,11	-45,15	-0,01	0,03810	0,00224	0,04728	1,00000	14
	68419	7,70	8,08	27,37	45,10	-45,12	-0,01	0,03397	0,00163	0,04038	1,00000	15

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
	61472	8,68	12,29	29,20	45,07	-45,09	-0,01	0,02528	0,00110	0,03323	1,00000	16
	50021	8,69	10,83	29,93	45,06	-45,08	-0,01	0,02657	0,00133	0,03640	1,00000	17
	39874	9,23	11,69	31,37	45,01	-45,11	-0,01	0,03186	0,00223	0,04721	1,00000	18
	29247	9,89	11,88	33,55	45,00	-45,10	-0,01	0,05503	0,00993	0,09964	0,99999	19
	23693	10,40	7,56	35,45	45,01	-45,09	-0,02	0,08594	0,03345	0,18289	0,99997	20
KNNBase.ACC	80163	12,87	17,43	31,07	44,98	-45,15	-4,86	5,59885	85,59795	9,25192	0,87734	12
	132406	12,82	17,33	31,02	44,98	-45,25	-4,85	5,65497	86,34445	9,29217	0,87483	13
	184540	12,27	14,79	30,69	44,98	-45,22	-4,41	5,22876	73,77593	8,58929	0,89268	14
	68419	10,54	9,66	30,35	44,98	-45,20	-2,83	3,62329	48,28174	6,94851	0,93557	15
	61472	12,08	15,21	32,35	44,98	-45,21	-3,39	4,14736	56,13192	7,49212	0,93418	16
	50021	11,66	13,37	32,63	44,98	-45,20	-2,96	3,70279	50,84478	7,13055	0,94328	17
	39874	11,72	14,32	33,56	44,98	-45,22	-2,49	3,23410	42,35557	6,50812	0,95697	18
	29247	11,62	14,31	34,94	44,98	-45,21	-1,72	2,48399	32,32461	5,68547	0,97134	19
	23693	11,26	10,46	36,08	44,98	-45,21	-0,84	1,59868	18,37050	4,28608	0,98542	20
MLP.ACC	80163	5,61	0,00	26,23	45,00	-44,98	2,40	3,42235	44,75660	6,69004	0,93587	12
	132406	5,50	0,00	26,08	45,00	-44,98	2,46	3,45590	45,17089	6,72093	0,93452	13
	184540	5,43	0,00	26,09	45,00	-44,98	2,44	3,51512	42,77238	6,54006	0,93778	14
	68419	5,41	0,00	27,30	45,00	-44,98	2,30	3,24932	36,10439	6,00869	0,95182	15
	61472	6,79	0,00	29,14	45,00	-44,98	1,90	2,94415	33,54489	5,79179	0,96067	16
	50021	6,96	0,00	29,87	45,00	-44,98	1,73	2,71438	30,07619	5,48418	0,96645	17
	39874	7,81	0,00	31,31	45,00	-44,98	1,43	2,41146	25,42161	5,04198	0,97418	18
	29247	9,18	0,00	33,49	45,00	-44,98	0,72	1,80080	18,10659	4,25518	0,98394	19
	23693	10,30	0,00	35,38	45,00	-44,98	0,12	1,20604	12,70788	3,56481	0,98992	20
RF.ACC	80163	5,81	0,00	26,06	44,76	-44,68	2,20	3,56775	46,65956	6,83078	0,93314	12
	132406	5,70	0,00	25,90	44,76	-44,68	2,26	3,60495	47,08001	6,86149	0,93175	13
	184540	5,65	0,00	25,92	44,76	-44,68	2,21	3,67737	44,68996	6,68505	0,93499	14
	68419	5,63	0,00	27,08	44,76	-44,68	2,08	3,41303	37,58591	6,13073	0,94984	15
	61472	6,96	0,00	28,95	44,76	-44,68	1,73	3,12136	35,04288	5,91970	0,95891	16
	50021	7,11	0,00	29,67	44,76	-44,68	1,58	2,88368	31,32782	5,59713	0,96505	17
	39874	7,93	0,00	31,10	44,76	-44,68	1,31	2,58955	26,55177	5,15284	0,97303	18
	29247	9,23	0,00	33,28	45,00	-44,68	0,66	1,97190	18,73349	4,32822	0,98339	19
	23693	10,27	0,00	35,19	45,00	-44,68	0,14	1,36925	12,80596	3,57854	0,98984	20
KNNBase.ACC.Sred	80163	8,33	17,43	26,96	45,17	-44,94	-0,33	1,00743	2,83232	1,68295	0,99594	12
	132406	8,21	17,33	26,82	45,10	-45,06	-0,25	0,99598	2,83698	1,68433	0,99589	13
	184540	8,15	14,79	26,78	45,16	-45,02	-0,29	1,08512	2,91882	1,70846	0,99575	14
	68419	7,96	9,66	27,83	45,15	-45,00	-0,25	1,04289	2,65147	1,62834	0,99646	15
	61472	8,94	15,21	29,58	45,16	-45,01	-0,25	1,12702	2,94918	1,71732	0,99654	16
	50021	8,92	13,37	30,24	45,18	-45,00	-0,23	1,12368	2,98709	1,72832	0,99667	17
	39874	9,42	14,32	31,62	45,18	-45,03	-0,19	1,16682	3,54946	1,88400	0,99639	18
	29247	9,99	14,31	33,65	45,16	-45,02	-0,10	1,25248	5,32801	2,30825	0,99528	19
	23693	10,43	10,46	35,43	45,17	-45,01	-0,02	1,26795	8,44150	2,90543	0,99330	20
MLP.ACC.Sred	80163	5,62	0,00	26,18	44,81	-44,77	2,38	3,44645	44,75958	6,69026	0,93586	12
	132406	5,51	0,00	26,02	44,81	-44,77	2,45	3,45931	45,16558	6,72053	0,93453	13
	184540	5,44	0,00	26,04	44,81	-44,77	2,43	3,52656	42,76694	6,53964	0,93779	14

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
	68419	5,41	0,00	27,22	44,81	-44,77	2,30	3,29178	36,10841	6,00903	0,95181	15
	61472	6,79	0,00	29,06	44,81	-44,77	1,90	2,99220	33,55015	5,79225	0,96066	16
	50021	6,95	0,00	29,78	44,81	-44,77	1,74	2,77469	30,08865	5,48531	0,96644	17
	39874	7,80	0,00	31,20	44,81	-44,77	1,44	2,48488	25,43634	5,04345	0,97416	18
	29247	9,16	0,00	33,36	45,00	-44,77	0,74	1,89749	18,12320	4,25714	0,98393	19
	23693	10,27	0,00	35,24	45,00	-44,77	0,15	1,32483	12,73778	3,56900	0,98989	20
RF.ACC.Sred	80163	5,81	0,00	25,84	43,75	-43,31	2,20	3,94214	47,23592	6,87284	0,93231	12
	132406	5,70	0,00	25,70	43,75	-43,31	2,26	3,96628	47,64523	6,90255	0,93093	13
	184540	5,65	0,00	25,76	43,75	-43,31	2,21	3,97793	45,17925	6,72155	0,93428	14
	68419	5,59	0,00	26,68	43,75	-43,31	2,12	3,75710	38,22093	6,18231	0,94899	15
	61472	6,92	0,00	28,53	43,75	-43,31	1,77	3,44384	35,75935	5,97991	0,95807	16
	50021	7,06	0,00	29,16	43,75	-43,31	1,64	3,24386	32,11096	5,66665	0,96418	17
	39874	7,86	0,00	30,53	44,02	-43,31	1,37	3,01271	27,44746	5,23903	0,97212	18
	29247	9,13	0,00	32,57	45,00	-43,31	0,77	2,51613	19,70796	4,43936	0,98252	19
	23693	10,17	0,00	34,37	45,00	-43,31	0,25	2,02779	13,78372	3,71264	0,98906	20

Tabela 91. Wyniki estymacji dla danych z ACC i GYRO i modeli powstałych na bazie ACC i GYRO

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
EstANN12	80163	7,529	12,015	28,193	61,595	-71,271	-0,477	1,75404	42,78813	6,54126	0,93869	12
	132406	7,583	12,702	27,418	61,595	-71,271	-0,379	1,16431	27,18447	5,21387	0,96060	13
	184540	7,805	11,986	26,374	61,594	-71,214	-0,058	0,26776	3,36141	1,83341	0,99511	14
	68419	7,692	8,195	27,371	45,079	-56,817	-0,014	0,26016	0,09404	0,30665	0,99987	15
	61472	8,687	12,354	29,229	45,089	-45,126	-0,007	0,51084	0,35659	0,59715	0,99958	16
	50021	8,697	10,914	29,986	45,101	-45,123	-0,005	0,61153	0,56952	0,75467	0,99937	17
	39874	9,239	11,778	31,430	45,125	-45,125	-0,004	0,76836	1,08309	1,04071	0,99891	18
	29247	9,908	11,729	33,694	45,101	-45,126	-0,025	0,96457	2,69949	1,64301	0,99765	19
	23693	10,444	5,374	35,696	45,137	-45,125	-0,050	0,86871	4,60891	2,14684	0,99644	20
EstANN13	80163	7,594	12,001	28,182	61,595	-71,271	-0,412	1,80117	42,80649	6,54267	0,93866	12
	132406	7,651	12,803	27,405	61,595	-71,271	-0,311	1,11645	27,17590	5,21305	0,96061	13
	184540	7,878	11,966	26,360	61,594	-71,214	0,015	0,22883	3,34800	1,82976	0,99513	14
	68419	7,763	8,157	27,357	45,151	-56,817	0,057	0,23964	0,07531	0,27443	0,99990	15
	61472	8,758	12,390	29,217	45,164	-45,123	0,064	0,49078	0,31682	0,56287	0,99963	16
	50021	8,767	10,856	29,975	45,180	-45,123	0,065	0,59606	0,52235	0,72274	0,99942	17
	39874	9,307	11,737	31,419	45,220	-45,164	0,065	0,75836	1,02180	1,01084	0,99897	18
	29247	9,975	11,677	33,683	45,181	-45,144	0,042	0,96844	2,62825	1,62119	0,99771	19
	23693	10,510	5,502	35,684	45,252	-45,123	0,016	0,88351	4,55245	2,13365	0,99648	20
EstANN14	80163	7,540	12,022	28,180	61,595	-71,271	-0,466	1,84873	42,83411	6,54478	0,93862	12
	132406	7,593	12,756	27,409	61,595	-71,271	-0,370	1,18561	27,20271	5,21562	0,96057	13
	184540	7,818	11,901	26,362	61,594	-71,214	-0,045	0,18891	3,34487	1,82890	0,99514	14
	68419	7,698	8,080	27,355	45,063	-56,817	-0,008	0,20169	0,05388	0,23212	0,99993	15
	61472	8,692	12,269	29,218	45,063	-45,490	-0,002	0,45730	0,25117	0,50117	0,99971	16
	50021	8,698	10,874	29,977	45,063	-45,490	-0,004	0,57414	0,44130	0,66430	0,99951	17
	39874	9,234	11,773	31,419	45,063	-45,681	-0,008	0,75154	0,91647	0,95733	0,99908	18
	29247	9,898	11,716	33,683	45,063	-45,583	-0,035	0,99232	2,49900	1,58082	0,99782	19
	23693	10,426	5,509	35,683	45,063	-45,491	-0,067	0,93271	4,44856	2,10916	0,99656	20
EstANN15	80163	7,534	12,113	28,170	61,595	-71,271	-0,473	1,99542	42,94209	6,55302	0,93847	12
	132406	7,586	12,682	27,398	61,595	-71,271	-0,376	1,33666	27,28612	5,22361	0,96045	13
	184540	7,812	11,875	26,357	61,594	-71,214	-0,052	0,33400	3,38471	1,83976	0,99508	14
	68419	7,687	8,053	27,330	45,041	-56,817	-0,019	0,09415	0,03924	0,19809	0,99995	15
	61472	8,682	12,289	29,201	45,041	-45,139	-0,011	0,33990	0,13715	0,37034	0,99984	16
	50021	8,688	10,818	29,957	45,041	-45,139	-0,014	0,47402	0,28619	0,53497	0,99968	17
	39874	9,222	11,602	31,390	45,041	-45,150	-0,020	0,67474	0,69818	0,83557	0,99930	18
	29247	9,883	11,833	33,646	45,039	-45,145	-0,050	0,95625	2,20410	1,48462	0,99808	19
	23693	10,410	5,705	35,634	45,039	-45,139	-0,084	0,93301	4,18813	2,04649	0,99676	20
EstANN16	80163	7,508	12,125	28,157	61,595	-71,271	-0,498	2,30299	43,32922	6,58249	0,93791	12
	132406	7,556	12,622	27,384	61,595	-71,271	-0,407	1,66130	27,64185	5,25755	0,95994	13
	184540	7,786	11,928	26,352	61,594	-71,214	-0,077	0,68928	3,66926	1,91553	0,99466	14
	68419	7,640	8,045	27,301	45,005	-56,817	-0,066	0,37804	0,17548	0,41890	0,99977	15
	61472	8,638	12,229	29,193	45,000	-45,052	-0,055	0,13248	0,06512	0,25518	0,99992	16
	50021	8,638	10,763	29,951	45,005	-45,052	-0,063	0,28590	0,11479	0,33880	0,99987	17

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
	39874	9,164	11,662	31,374	45,005	-45,052	-0,079	0,53564	0,37813	0,61493	0,99962	18
	29247	9,806	11,458	33,623	45,005	-45,052	-0,127	0,90909	1,69425	1,30163	0,99852	19
	23693	10,322	6,067	35,602	45,005	-45,051	-0,172	0,95944	3,71398	1,92717	0,99713	20
EstANNRaw	80163	7,986	12,677	28,149	61,595	-71,271	-0,021	2,10802	43,08199	6,56369	0,93827	12
	132406	8,083	13,157	27,363	61,595	-71,271	0,120	1,46463	27,44349	5,23865	0,96023	13
	184540	8,365	12,774	26,338	61,594	-71,214	0,501	0,67652	3,77701	1,94345	0,99451	14
	68419	8,179	8,607	27,244	45,000	-56,817	0,473	0,54540	0,53609	0,73218	0,99928	15
	61472	9,155	12,910	29,089	45,000	-45,000	0,462	0,73445	0,89247	0,94471	0,99896	16
	50021	9,127	11,648	29,805	45,000	-45,000	0,425	0,83460	1,11504	1,05595	0,99877	17
	39874	9,622	12,160	31,216	45,000	-45,000	0,379	1,00494	1,68255	1,29713	0,99831	18
	29247	10,223	11,993	33,438	45,000	-45,000	0,290	1,18538	3,20123	1,78920	0,99721	19
	23693	10,678	6,144	35,394	45,000	-45,000	0,185	1,10821	4,95416	2,22580	0,99617	20
EstWiel12	80163	8,001	14,218	26,412	45,329	-45,283	-0,005	0,20402	0,06660	0,25807	0,99990	12
	132406	7,881	14,036	26,275	45,219	-45,446	-0,081	0,15654	0,04536	0,21297	0,99993	13
	184540	7,832	11,900	26,226	45,314	-45,389	-0,032	0,14246	0,02730	0,16521	0,99996	14
	68419	7,693	8,067	27,381	45,282	-45,387	-0,013	0,28741	0,09025	0,30042	0,99988	15
	61472	8,689	12,306	29,240	45,314	-45,388	-0,005	0,53994	0,35479	0,59564	0,99959	16
	50021	8,700	10,762	30,002	45,356	-45,388	-0,002	0,64861	0,56844	0,75395	0,99937	17
	39874	9,243	11,538	31,449	45,480	-45,480	0,000	0,81482	1,08027	1,03936	0,99891	18
	29247	9,914	11,481	33,718	45,357	-45,434	-0,019	1,02960	2,71014	1,64625	0,99764	19
	23693	10,452	5,366	35,726	45,625	-45,389	-0,042	0,95242	4,63366	2,15259	0,99642	20
EstWiel13	80163	8,067	14,268	26,391	45,333	-45,089	0,061	0,22210	0,08126	0,28506	0,99988	12
	132406	7,951	14,141	26,252	45,227	-45,243	-0,012	0,13078	0,04343	0,20839	0,99994	13
	184540	7,906	11,986	26,206	45,318	-45,189	0,042	0,11285	0,02146	0,14650	0,99997	14
	68419	7,766	8,106	27,348	45,288	-45,187	0,060	0,26069	0,07801	0,27931	0,99990	15
	61472	8,761	12,381	29,209	45,318	-45,189	0,067	0,51497	0,32391	0,56913	0,99962	16
	50021	8,771	10,839	29,967	45,359	-45,189	0,069	0,62719	0,53063	0,72844	0,99941	17
	39874	9,311	11,657	31,409	45,478	-45,275	0,069	0,79807	1,03026	1,01502	0,99896	18
	29247	9,980	11,600	33,669	45,360	-45,232	0,047	1,02240	2,64445	1,62618	0,99770	19
	23693	10,516	5,490	35,669	45,618	-45,189	0,022	0,95211	4,57526	2,13899	0,99646	20
EstWiel14	80163	8,014	14,244	26,400	45,403	-45,239	0,008	0,26629	0,11130	0,33361	0,99984	12
	132406	7,897	14,060	26,262	45,297	-45,393	-0,066	0,19455	0,07052	0,26555	0,99990	13
	184540	7,851	11,927	26,217	45,388	-45,339	-0,013	0,08017	0,01903	0,13794	0,99997	14
	68419	7,711	8,067	27,359	45,358	-45,337	0,005	0,22226	0,05834	0,24154	0,99992	15
	61472	8,707	12,262	29,224	45,388	-45,339	0,013	0,48100	0,25927	0,50919	0,99970	16
	50021	8,717	10,872	29,984	45,429	-45,339	0,016	0,60542	0,45070	0,67134	0,99950	17
	39874	9,258	11,690	31,426	45,549	-45,425	0,016	0,79257	0,92669	0,96265	0,99907	18
	29247	9,928	11,633	33,688	45,430	-45,382	-0,005	1,04821	2,51510	1,58591	0,99781	19
	23693	10,464	5,524	35,688	45,689	-45,339	-0,030	1,00460	4,47229	2,11478	0,99654	20
EstWiel15	80163	8,007	14,261	26,392	45,515	-45,412	0,000	0,41444	0,22636	0,47578	0,99968	12
	132406	7,889	13,953	26,255	45,409	-45,566	-0,074	0,35640	0,16549	0,40680	0,99976	13
	184540	7,842	11,933	26,210	45,500	-45,512	-0,021	0,22329	0,06709	0,25901	0,99990	14
	68419	7,701	8,025	27,347	45,470	-45,510	-0,005	0,16201	0,07146	0,26731	0,99990	15
	61472	8,698	12,295	29,220	45,500	-45,511	0,004	0,40831	0,18184	0,42643	0,99979	16

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
	50021	8,707	10,763	29,983	45,540	-45,511	0,006	0,55805	0,34169	0,58454	0,99962	17
	39874	9,248	11,581	31,421	45,660	-45,597	0,005	0,77856	0,76699	0,87578	0,99923	18
	29247	9,917	11,809	33,682	45,541	-45,554	-0,016	1,09544	2,30121	1,51697	0,99800	19
	23693	10,452	5,713	35,678	45,799	-45,512	-0,041	1,10545	4,30664	2,07525	0,99667	20
EstWiel16	80163	8,170	14,330	26,406	45,883	-45,412	0,163	0,57765	0,43416	0,65891	0,99938	12
	132406	8,059	14,034	26,270	45,779	-45,566	0,097	0,52701	0,33031	0,57473	0,99952	13
	184540	8,025	12,160	26,225	45,868	-45,512	0,162	0,40626	0,20959	0,45781	0,99970	14
	68419	7,875	8,242	27,365	45,839	-45,510	0,169	0,31621	0,17336	0,41637	0,99977	15
	61472	8,872	12,432	29,247	45,868	-45,511	0,179	0,33620	0,19194	0,43811	0,99978	16
	50021	8,877	11,015	30,016	45,908	-45,511	0,176	0,50093	0,31468	0,56097	0,99965	17
	39874	9,411	11,670	31,455	46,024	-45,597	0,169	0,75519	0,68085	0,82514	0,99931	18
	29247	10,072	11,876	33,724	45,908	-45,554	0,139	1,13253	2,13765	1,46207	0,99814	19
	23693	10,598	6,079	35,721	46,159	-45,512	0,104	1,19182	4,17223	2,04260	0,99677	20
EstWiel17	80163	8,000	14,058	26,435	46,116	-45,980	-0,007	0,96376	1,06102	1,03006	0,99848	12
	132406	7,879	13,909	26,303	46,013	-46,126	-0,084	0,93349	0,95372	0,97658	0,99862	13
	184540	7,829	11,933	26,254	46,101	-46,075	-0,035	0,84508	0,73950	0,85994	0,99892	14
	68419	7,690	8,137	27,406	46,072	-46,073	-0,016	0,71650	0,56769	0,75345	0,99924	15
	61472	8,695	12,206	29,306	46,101	-46,074	0,001	0,46448	0,34832	0,59019	0,99959	16
	50021	8,707	10,844	30,090	46,140	-46,074	0,006	0,38103	0,37111	0,60919	0,99959	17
	39874	9,249	11,502	31,529	46,255	-46,156	0,007	0,69240	0,58535	0,76508	0,99941	18
	29247	9,927	11,276	33,811	46,141	-46,115	-0,006	1,21216	1,86584	1,36596	0,99838	19
	23693	10,467	6,332	35,809	46,389	-46,075	-0,026	1,38941	3,98708	1,99677	0,99692	20
EstRegWiel	80163	8,054	14,248	26,413	45,117	-45,245	0,047	0,12584	0,02448	0,15645	0,99996	12
	132406	7,934	14,133	26,279	45,005	-45,414	-0,028	0,06003	0,00732	0,08556	0,99999	13
	184540	7,879	11,972	26,228	45,101	-45,355	0,016	0,08686	0,01148	0,10713	0,99998	14
	68419	7,679	8,081	27,403	45,079	-45,352	-0,027	0,08436	0,01119	0,10577	0,99999	15
	61472	8,668	12,201	29,301	45,101	-45,354	-0,026	0,06953	0,00895	0,09460	0,99999	16
	50021	8,673	10,854	30,092	45,144	-45,354	-0,028	0,06825	0,01007	0,10037	0,99999	17
	39874	9,211	11,487	31,561	45,271	-45,449	-0,031	0,08196	0,01369	0,11700	0,99999	18
	29247	9,887	11,144	33,934	45,145	-45,402	-0,046	0,09142	0,03095	0,17592	0,99997	19
	23693	10,440	5,849	35,996	45,419	-45,355	-0,054	0,12535	0,12129	0,34827	0,99991	20
EstRegWielORT	80163	8,051	14,227	26,392	45,069	-44,975	0,044	0,12717	0,02419	0,15554	0,99997	12
	132406	7,931	14,132	26,256	44,961	-45,135	-0,031	0,05757	0,00525	0,07248	0,99999	13
	184540	7,875	11,953	26,212	45,099	-45,078	0,012	0,07193	0,00757	0,08703	0,99999	14
	68419	7,701	8,090	27,353	45,073	-45,076	-0,005	0,07955	0,00850	0,09220	0,99999	15
	61472	8,692	12,202	29,248	45,054	-45,078	-0,002	0,06333	0,00598	0,07734	0,99999	16
	50021	8,702	10,853	30,028	45,095	-45,078	0,000	0,05902	0,00641	0,08005	0,99999	17
	39874	9,247	11,487	31,484	45,216	-45,167	0,004	0,06842	0,00890	0,09434	0,99999	18
	29247	9,936	11,145	33,836	45,096	-45,123	0,003	0,07547	0,02637	0,16237	0,99998	19
	23693	10,500	5,848	35,882	45,359	-45,078	0,006	0,10070	0,11581	0,34031	0,99991	20
EstRegWielSred	80163	8,041	14,257	26,390	45,045	-45,050	0,035	0,13551	0,02903	0,17038	0,99996	12
	132406	7,922	14,123	26,257	44,937	-45,211	-0,040	0,07631	0,00877	0,09366	0,99999	13
	184540	7,862	11,961	26,213	45,120	-45,154	-0,002	0,06548	0,00695	0,08338	0,99999	14
	68419	7,689	8,084	27,359	45,040	-45,152	-0,017	0,06760	0,00665	0,08157	0,99999	15

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
	61472	8,679	12,188	29,254	45,030	-45,154	-0,015	0,05687	0,00519	0,07203	0,99999	16
	50021	8,685	10,823	30,038	45,071	-45,154	-0,016	0,06319	0,00679	0,08243	0,99999	17
	39874	9,225	11,492	31,495	45,193	-45,244	-0,017	0,06621	0,00809	0,08995	0,99999	18
	29247	9,907	11,183	33,854	45,072	-45,199	-0,026	0,07310	0,02528	0,15898	0,99998	19
	23693	10,463	5,753	35,905	45,335	-45,154	-0,031	0,10179	0,11447	0,33833	0,99991	20
KNNBase.ACC	80163	9,387	19,206	33,586	44,982	-46,434	-1,380	9,03739	205,94768	14,35088	0,70490	12
	132406	9,950	19,408	33,072	44,982	-46,375	-1,988	8,80125	196,26485	14,00946	0,71555	13
	184540	11,006	18,731	31,726	44,982	-46,298	-3,143	8,26225	181,60222	13,47599	0,73594	14
	68419	8,821	2,920	28,479	44,970	-46,385	-1,115	6,06499	114,17056	10,68506	0,84769	15
	61472	4,564	2,920	26,195	44,953	-46,998	4,130	8,64368	214,08102	14,63151	0,75010	16
	50021	4,487	2,920	27,680	44,953	-46,976	4,215	7,93643	192,33424	13,86846	0,78708	17
	39874	5,102	2,920	29,810	44,953	-47,708	4,140	7,27480	173,25632	13,16269	0,82554	18
	29247	5,393	2,920	33,238	44,953	-47,698	4,540	6,13376	143,32146	11,97169	0,87521	19
	23693	6,118	2,920	35,967	44,953	-48,703	4,376	4,97801	112,09602	10,58754	0,91330	20
MLP.ACC	80163	6,496	9,762	26,797	45,000	-45,000	1,511	2,49582	20,24345	4,49927	0,97099	12
	132406	6,598	11,250	26,486	45,000	-45,000	1,364	2,00890	13,10003	3,61940	0,98101	13
	184540	6,605	10,509	26,197	45,000	-45,000	1,259	1,34605	2,96357	1,72150	0,99569	14
	68419	6,564	6,685	27,205	45,000	-45,000	1,142	1,17614	1,55526	1,24710	0,99793	15
	61472	7,568	10,963	29,084	45,000	-45,000	1,126	1,16326	1,53735	1,23990	0,99821	16
	50021	7,641	9,527	29,836	45,000	-45,000	1,061	1,10599	1,44671	1,20279	0,99840	17
	39874	8,244	10,377	31,257	45,000	-45,000	0,999	1,05448	1,38994	1,17896	0,99860	18
	29247	9,019	10,470	33,463	45,000	-45,000	0,914	1,04089	1,80861	1,34484	0,99843	19
	23693	9,642	3,161	35,378	45,000	-45,000	0,851	1,27836	3,58994	1,89471	0,99722	20
RF.ACC	80163	6,502	9,770	26,826	45,000	-45,000	1,504	2,47270	20,19449	4,49383	0,97106	12
	132406	6,607	11,363	26,501	45,000	-45,000	1,355	1,99575	13,09837	3,61917	0,98102	13
	184540	6,611	10,517	26,191	45,000	-45,000	1,253	1,34431	2,95992	1,72044	0,99570	14
	68419	6,574	6,690	27,187	45,000	-45,000	1,132	1,17882	1,55253	1,24600	0,99793	15
	61472	7,583	10,893	29,064	45,000	-45,000	1,111	1,16286	1,52921	1,23661	0,99821	16
	50021	7,634	9,450	29,811	45,000	-45,000	1,068	1,13105	1,50397	1,22636	0,99834	17
	39874	8,284	10,350	31,212	45,000	-45,000	0,958	1,03939	1,38657	1,17753	0,99860	18
	29247	9,103	7,030	33,519	45,000	-45,000	0,830	1,35904	4,05448	2,01357	0,99647	19
	23693	9,041	0,790	34,447	45,000	-45,000	1,452	3,31256	73,84751	8,59346	0,94288	20
KNNBase.ACC.GYRO	80163	8,147	12,040	27,121	45,000	-45,000	-0,140	1,52421	22,16673	4,70816	0,96824	12
	132406	7,990	12,820	26,695	45,000	-45,000	-0,028	0,95602	13,98534	3,73970	0,97973	13
	184540	7,876	11,870	26,246	45,000	-45,000	-0,013	0,17178	1,65107	1,28494	0,99760	14
	68419	7,744	8,100	27,271	45,000	-45,000	-0,038	0,11683	0,08467	0,29099	0,99989	15
	61472	8,736	12,235	29,158	45,000	-45,000	-0,042	0,10760	0,08830	0,29715	0,99990	16
	50021	8,750	10,860	29,921	45,000	-45,000	-0,049	0,12784	0,10770	0,32818	0,99988	17
	39874	9,296	11,530	31,347	45,000	-45,000	-0,053	0,16418	0,16614	0,40760	0,99983	18
	29247	10,022	11,250	33,661	45,000	-45,000	-0,089	0,22880	0,26074	0,51063	0,99977	19
	23693	10,591	6,720	35,652	45,000	-45,000	-0,097	0,31609	0,53793	0,73344	0,99958	20
MLP.ACC.GYRO	80163	8,972	14,890	26,819	45,489	-45,146	-0,965	1,06462	10,03412	3,16767	0,98562	12
	132406	8,527	14,430	26,535	45,382	-45,275	-0,564	0,66071	6,18536	2,48704	0,99104	13
	184540	7,987	12,022	26,261	45,475	-45,228	-0,124	0,16565	0,73831	0,85925	0,99893	14

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
	68419	7,778	8,061	27,372	46,185	-45,253	-0,072	0,13739	0,03548	0,18837	0,99995	15
	61472	8,770	12,241	29,264	46,021	-45,635	-0,076	0,13249	0,03618	0,19022	0,99996	16
	50021	8,791	10,790	30,052	46,973	-45,760	-0,089	0,14470	0,04397	0,20969	0,99995	17
	39874	9,345	11,488	31,515	47,169	-46,448	-0,103	0,16645	0,06060	0,24616	0,99994	18
	29247	10,056	11,154	33,900	48,244	-46,522	-0,123	0,21192	0,11342	0,33678	0,99990	19
	23693	10,655	5,625	36,018	49,748	-48,239	-0,162	0,27768	0,31070	0,55740	0,99976	20
RF.ACC.GYRO	80163	8,079	12,030	27,243	45,000	-45,000	-0,072	1,51789	22,42094	4,73508	0,96787	12
	132406	7,949	12,816	26,767	45,000	-45,000	0,013	0,94738	14,11553	3,75706	0,97954	13
	184540	7,873	11,874	26,263	45,000	-45,000	-0,009	0,15948	1,66047	1,28859	0,99759	14
	68419	7,755	8,080	27,293	45,000	-45,000	-0,049	0,09664	0,07652	0,27661	0,99990	15
	61472	8,751	12,278	29,180	45,000	-45,000	-0,057	0,08670	0,08105	0,28469	0,99991	16
	50021	8,768	10,860	29,947	45,000	-45,000	-0,067	0,10279	0,09819	0,31335	0,99989	17
	39874	9,325	11,530	31,388	45,000	-45,000	-0,083	0,12154	0,12072	0,34745	0,99988	18
	29247	10,041	11,250	33,724	45,000	-45,000	-0,108	0,16999	0,17479	0,41808	0,99985	19
	23693	10,614	5,765	35,763	45,000	-45,000	-0,120	0,22097	0,27422	0,52366	0,99979	20

Tabela 92. Wyniki estymacji modeli dla pomiarów z ortometru

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
Pomiary.ORT	5184	7,74	11,44	25,51	46,23	-45,54	0,09815	0,40452	0,23757	0,48741	0,99963	12
	3088	7,23	10,80	25,95	45,80	-45,40	0,10078	0,69920	0,58967	0,76790	0,99911	13
	3199	7,95	11,21	26,58	45,83	-45,65	0,10407	1,27797	1,89668	1,37720	0,99726	14
	2247	7,91	10,29	27,66	46,26	-45,62	0,04749	2,22871	6,16335	2,48261	0,99178	15
	1892	8,47	11,12	29,37	46,20	-46,08	-0,09848	3,59673	18,60131	4,31292	0,97822	16
	2350	7,75	10,02	29,87	45,68	-46,90	-1,16319	4,65014	30,76856	5,54694	0,96559	17
	2333	8,06	9,68	30,75	46,04	-46,87	-1,40368	6,01658	57,67498	7,59440	0,94031	18
EstANN12	5184	7,89	11,79	25,85	61,52	-67,79	0,25522	0,61093	1,89033	1,37489	0,99704	12
	3088	7,38	11,28	26,21	45,59	-46,43	0,24667	0,63490	0,63736	0,79835	0,99904	13
	3199	8,09	11,65	26,80	45,60	-46,57	0,24297	1,08733	1,71501	1,30958	0,99752	14
	2247	8,03	10,61	27,84	45,60	-46,57	0,16737	2,04389	5,57927	2,36205	0,99256	15
	1892	8,62	11,56	29,52	45,59	-46,53	0,05322	3,43471	17,42201	4,17397	0,97960	16
	2350	8,12	9,95	30,09	45,14	-46,72	-0,79339	4,30448	28,82580	5,36897	0,96776	17
	2333	8,50	9,96	31,10	45,14	-46,53	-0,96237	5,62262	54,95114	7,41290	0,94313	18
EstANN13	5184	7,97	11,74	25,84	61,52	-67,79	0,32783	0,61849	1,88606	1,37334	0,99704	12
	3088	7,45	11,21	26,20	45,92	-45,64	0,31807	0,62441	0,61025	0,78119	0,99908	13
	3199	8,16	11,59	26,79	45,94	-45,74	0,31459	1,05637	1,63593	1,27904	0,99764	14
	2247	8,11	10,73	27,84	45,94	-45,74	0,23921	2,01810	5,41193	2,32636	0,99278	15
	1892	8,69	11,48	29,54	45,91	-45,71	0,12289	3,41801	17,14376	4,14050	0,97993	16
	2350	8,17	10,07	30,07	45,31	-45,84	-0,73515	4,25633	28,26582	5,31656	0,96839	17
	2333	8,55	10,15	31,07	45,31	-45,71	-0,91222	5,58958	54,48054	7,38109	0,94362	18
EstANN14	3088	7,36	11,18	26,17	45,90	-47,16	0,23288	0,60596	0,58444	0,76449	0,99912	13
	5184	7,89	11,72	25,81	61,52	-67,79	0,25360	0,61221	1,90444	1,38001	0,99702	12
	3199	8,07	11,50	26,72	45,93	-47,42	0,22290	1,04523	1,64841	1,28390	0,99762	14
	2247	7,98	10,75	27,71	45,93	-47,40	0,10956	2,04048	5,37060	2,31746	0,99284	15
	1892	8,53	11,50	29,43	45,89	-47,61	-0,03365	3,47433	16,87656	4,10811	0,98024	16
	2350	8,36	10,04	29,70	45,06	-47,69	-0,54502	4,50569	31,63550	5,62455	0,96462	17
	2333	8,54	10,15	31,01	45,06	-47,69	-0,92968	5,69245	54,21612	7,36316	0,94389	18
EstANN15	3088	7,22	10,90	26,07	45,03	-47,74	0,09122	0,67141	4,83725	2,19938	0,99268	13
	5184	7,76	11,55	25,73	61,52	-67,79	0,12742	0,70862	5,19725	2,27975	0,99186	12
	3199	7,74	11,08	26,54	45,04	-48,52	-0,10697	1,15238	12,12419	3,48198	0,98249	14
	2247	7,35	9,81	27,35	45,04	-48,52	-0,51831	2,40280	26,03841	5,10278	0,96527	15
	1892	7,86	11,21	28,88	45,04	-48,26	-0,70688	3,86302	29,46016	5,42772	0,96550	16
	2350	8,04	10,10	30,21	45,04	-50,33	-0,86822	4,16380	26,82489	5,17928	0,97000	17
	2333	8,46	10,12	31,15	45,04	-48,28	-1,00623	5,49868	52,11259	7,21891	0,94607	18
EstANN16	3088	7,40	10,98	26,05	45,00	-45,05	0,27039	0,62302	3,56042	1,88691	0,99461	13
	5184	7,92	11,73	25,69	61,52	-67,79	0,28428	0,79547	5,51105	2,34756	0,99136	12
	3199	8,23	11,49	26,40	45,00	-45,05	0,38065	0,89641	11,75858	3,42908	0,98302	14
	2247	8,22	10,66	27,20	45,00	-45,05	0,35396	1,92419	20,16249	4,49027	0,97311	15
	1892	8,80	11,26	28,79	45,01	-45,05	0,23022	3,48022	32,80771	5,72780	0,96158	16
	2350	9,54	12,03	29,01	45,01	-45,05	0,63518	5,18129	114,44749	10,69801	0,87200	17
	2333	9,61	10,01	29,87	45,01	-45,05	0,14423	6,26176	92,78214	9,63235	0,90398	18
EstANNRaw	5184	8,44	12,27	25,77	61,52	-67,79	0,80103	1,02329	2,76177	1,66186	0,99567	12
	3088	7,90	11,86	26,11	45,00	-45,01	0,76772	1,04399	1,66590	1,29070	0,99748	13
	3199	8,56	12,02	26,62	45,00	-45,01	0,70925	1,39489	3,02914	1,74044	0,99563	14
	2247	8,39	10,91	27,52	45,00	-45,02	0,52748	2,34220	7,29120	2,70022	0,99028	15
	1892	8,87	12,05	29,08	45,00	-45,01	0,30091	3,74533	19,45025	4,41024	0,97722	16
	2350	8,65	10,83	29,90	45,00	-45,05	-0,25723	4,39844	29,70464	5,45020	0,96678	17
	2333	9,02	10,55	30,90	45,00	-45,01	-0,44691	5,70218	56,27804	7,50187	0,94176	18
EstRegWiel	5184	7,92	11,68	25,81	47,15	-46,18	0,27927	0,56529	0,43399	0,65878	0,99932	12
	3088	7,43	11,14	26,26	46,75	-46,11	0,29676	0,63972	0,61131	0,78186	0,99908	13
	3199	8,15	11,47	26,89	46,79	-46,40	0,30622	1,07768	1,60896	1,26845	0,99768	14
	2247	8,09	10,80	28,01	47,22	-46,51	0,21947	1,90750	4,62501	2,15058	0,99383	15
	1892	8,63	11,30	29,79	47,76	-47,30	0,06758	3,11426	13,54609	3,68050	0,98414	16
	2350	7,90	9,90	30,34	47,48	-48,37	-1,00800	3,95539	22,86643	4,78189	0,97443	17

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
	2333	8,22	9,76	31,31	48,47	-48,95	-1,24145	5,19677	43,98119	6,63183	0,95448	18
EstRegWielORT	5184	7,63	11,31	25,27	46,40	-45,92	-0,00981	0,14917	0,04020	0,20049	0,99994	12
	3088	7,12	10,57	25,72	45,86	-45,54	-0,00679	0,19824	0,06520	0,25534	0,99990	13
	3199	7,85	11,09	26,37	46,18	-46,00	-0,00142	0,40382	0,25002	0,50002	0,99964	14
	2247	7,78	10,10	27,56	46,39	-46,15	-0,08210	0,75634	0,93080	0,96478	0,99876	15
	1892	8,76	11,33	29,54	46,49	-46,25	0,19133	1,73174	5,69145	2,38568	0,99334	16
	2350	8,29	10,03	30,14	46,25	-48,89	-0,61666	2,73261	16,66049	4,08173	0,98137	17
	2333	0,26	-1,81	33,56	46,21	-225,56	-9,20455	11,14956	471,18249	21,70674	0,51236	18
EstRegWielORTZmod	5184	7,63	11,31	25,27	46,39	-45,92	-0,00982	0,14916	0,04019	0,20047	0,99994	12
	3088	7,12	10,57	25,72	45,87	-45,54	-0,00686	0,19830	0,06522	0,25538	0,99990	13
	3199	7,85	11,09	26,37	46,19	-46,01	-0,00060	0,40308	0,24931	0,49931	0,99964	14
	2247	7,77	10,10	27,55	46,42	-46,16	-0,09404	0,76587	0,95183	0,97562	0,99873	15
	1892	8,76	11,27	29,51	46,56	-46,27	0,19647	1,72226	5,78564	2,40534	0,99323	16
	2350	7,93	9,58	30,16	46,62	-47,11	-0,97904	3,14257	22,08118	4,69906	0,97530	17
	2333	8,15	11,90	30,71	109,42	-54,20	-1,31333	6,04714	75,82134	8,70755	0,92153	18
EstRegWielPow	5184	7,92	11,68	25,81	47,15	-46,18	0,27927	0,56529	0,43399	0,65878	0,99932	12
	3088	7,43	11,14	26,26	46,75	-46,11	0,29676	0,63972	0,61131	0,78186	0,99908	13
	3199	8,15	11,47	26,89	46,79	-46,40	0,30622	1,07768	1,60896	1,26845	0,99768	14
	2247	8,09	10,80	28,01	47,22	-46,51	0,21947	1,90750	4,62501	2,15058	0,99383	15
	1892	8,63	11,30	29,79	47,76	-47,30	0,06758	3,11426	13,54609	3,68050	0,98414	16
	2350	7,90	9,90	30,34	47,48	-48,37	-1,00800	3,95539	22,86643	4,78189	0,97443	17
	2333	8,22	9,76	31,31	48,47	-48,95	-1,24145	5,19677	43,98119	6,63183	0,95448	18
EstRegWielSred	5184	7,90	11,66	25,82	47,10	-46,29	0,26561	0,56535	0,43363	0,65851	0,99932	12
	3088	7,43	11,14	26,26	46,67	-46,17	0,29911	0,64371	0,62118	0,78815	0,99906	13
	3199	8,16	11,47	26,89	46,71	-46,48	0,31348	1,08420	1,62820	1,27601	0,99765	14
	2247	8,08	10,80	28,00	47,13	-46,55	0,21594	1,90474	4,61728	2,14878	0,99384	15
	1892	8,63	11,30	29,79	47,75	-47,29	0,06345	3,11263	13,54661	3,68057	0,98414	16
	2350	7,90	9,90	30,33	47,47	-48,36	-1,01070	3,95746	22,86937	4,78219	0,97442	17
	2333	8,22	9,76	31,31	48,45	-48,96	-1,24703	5,20106	43,99729	6,63305	0,95447	18
EstWiel12	5184	7,90	11,68	25,82	47,10	-46,42	0,25798	0,56128	0,42823	0,65440	0,99933	12
	3088	7,39	11,07	26,27	46,66	-46,25	0,25729	0,65819	0,65827	0,81134	0,99900	13
	3199	8,12	11,44	26,91	46,69	-46,54	0,26932	1,15335	1,77645	1,33284	0,99743	14
	2247	8,08	10,64	28,01	47,13	-46,51	0,21013	2,15558	5,73372	2,39452	0,99235	15
	1892	8,63	11,34	29,75	47,07	-47,01	0,06738	3,59040	17,69325	4,20633	0,97928	16
	2350	7,90	10,07	30,26	46,53	-47,92	-1,00967	4,49686	29,22909	5,40639	0,96731	17
	2333	8,22	10,09	31,16	46,90	-47,88	-1,24334	5,87263	55,72978	7,46524	0,94232	18
EstWiel13	5184	7,97	11,77	25,80	47,02	-46,15	0,33122	0,57509	0,44066	0,66383	0,99931	12
	3088	7,46	11,15	26,25	46,60	-45,99	0,33056	0,65382	0,64440	0,80275	0,99902	13
	3199	8,19	11,52	26,89	46,63	-46,27	0,34045	1,11661	1,71074	1,30795	0,99753	14
	2247	8,14	10,76	27,99	47,05	-46,23	0,27739	2,11616	5,56961	2,36000	0,99257	15
	1892	8,70	11,41	29,72	47,00	-46,70	0,13090	3,55078	17,38337	4,16934	0,97964	16
	2350	7,97	10,10	30,23	46,48	-47,52	-0,94187	4,45140	28,71917	5,35903	0,96788	17
	2333	8,29	10,19	31,13	46,83	-47,49	-1,17838	5,82608	55,11595	7,42401	0,94296	18
EstWiel14	5184	7,91	11,70	25,82	47,10	-46,30	0,27497	0,55431	0,40262	0,63453	0,99937	12
	3088	7,40	11,10	26,26	46,68	-46,14	0,27532	0,61221	0,55192	0,74291	0,99916	13
	3199	8,13	11,43	26,90	46,71	-46,42	0,28614	1,04334	1,51634	1,23140	0,99781	14
	2247	8,09	10,71	28,00	47,13	-46,38	0,22349	2,04790	5,22414	2,28564	0,99303	15
	1892	8,64	11,44	29,74	47,07	-46,85	0,07738	3,49748	16,82990	4,10243	0,98029	16
	2350	7,92	10,06	30,25	46,56	-47,67	-0,99458	4,41072	28,14583	5,30526	0,96852	17
	2333	8,24	10,19	31,15	46,91	-47,64	-1,22867	5,79857	54,39382	7,37522	0,94371	18
EstWiel15	5184	7,90	11,73	25,81	47,20	-46,47	0,26383	0,55359	0,40617	0,63731	0,99936	12
	3088	7,40	11,04	26,26	46,78	-46,31	0,26675	0,56466	0,44272	0,66538	0,99933	13
	3199	8,13	11,47	26,89	46,81	-46,58	0,27807	0,90362	1,19538	1,09333	0,99827	14
	2247	8,08	10,72	28,00	47,24	-46,55	0,21410	1,90599	4,56384	2,13631	0,99391	15
	1892	8,63	11,36	29,75	47,18	-47,01	0,06538	3,38113	15,70036	3,96237	0,98162	16
	2350	7,91	10,10	30,24	46,66	-47,83	-1,00333	4,30072	26,75755	5,17277	0,97007	17
	2333	8,23	10,15	31,15	47,02	-47,80	-1,23484	5,70517	52,63854	7,25524	0,94552	18

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
EstWiel16	3088	7,58	11,18	26,27	47,11	-46,31	0,44875	0,64190	0,55625	0,74582	0,99916	13
	5184	8,08	11,87	25,83	47,51	-46,47	0,44527	0,67254	0,63487	0,79679	0,99901	12
	3199	8,30	11,62	26,91	47,14	-46,58	0,45445	0,84580	1,09196	1,04497	0,99842	14
	2247	8,25	10,91	28,01	47,54	-46,55	0,38082	1,77404	4,09320	2,02317	0,99454	15
	1892	8,79	11,46	29,78	47,49	-47,01	0,22211	3,27592	14,70328	3,83449	0,98278	16
	2350	8,06	10,13	30,28	46,99	-47,83	-0,85093	4,18252	25,16576	5,01655	0,97185	17
	2333	8,38	10,31	31,18	47,33	-47,80	-1,08625	5,57118	50,60325	7,11360	0,94763	18
EstWiel17	3199	8,11	11,47	26,93	47,36	-47,08	0,26667	0,64564	0,64537	0,80335	0,99907	14
	3088	7,38	10,96	26,30	47,33	-46,83	0,25188	0,65066	0,63883	0,79927	0,99903	13
	5184	7,88	11,75	25,86	47,72	-46,97	0,23985	0,82907	1,00193	1,00097	0,99843	12
	2247	8,07	10,61	28,05	47,75	-47,05	0,20206	1,44558	2,82901	1,68197	0,99623	15
	1892	8,62	11,31	29,83	47,70	-47,48	0,05509	3,02033	12,32534	3,51075	0,98557	16
	2350	7,90	9,93	30,32	47,21	-48,23	-1,01398	3,95982	22,43713	4,73678	0,97491	17
	2333	8,23	9,84	31,23	47,55	-48,20	-1,23356	5,39177	46,99281	6,85513	0,95137	18
KNNBase	5184	7,63	11,31	25,22	45,00	-45,00	0,01042	0,16044	0,11744	0,34270	0,99982	12
	3088	7,11	10,78	25,63	45,00	-45,00	0,02134	0,24912	0,20447	0,45219	0,99969	13
	3199	7,83	11,17	26,24	45,00	-45,00	0,01738	0,33018	0,26437	0,51417	0,99962	14
	2247	7,79	10,14	27,26	45,00	-45,00	0,07242	0,60841	0,80055	0,89473	0,99893	15
	1892	8,34	10,58	29,15	45,00	-45,00	0,22831	1,14538	2,83606	1,68406	0,99668	16
	2350	8,34	10,11	29,55	45,00	-45,00	0,56685	1,81618	6,78691	2,60517	0,99241	17
	2333	8,49	9,84	30,57	45,00	-45,00	0,98006	2,66692	13,99873	3,74149	0,98551	18
MLP	5184	7,58	11,27	25,20	45,91	-45,89	0,05927	0,24160	0,15565	0,39453	0,99976	12
	3088	7,11	10,64	25,66	45,47	-45,61	0,02242	0,30451	0,21937	0,46837	0,99967	13
	3199	7,82	11,20	26,23	45,51	-45,95	0,03071	0,47829	0,42709	0,65352	0,99938	14
	2247	7,72	10,10	27,26	46,35	-46,23	0,14280	0,89195	1,24094	1,11397	0,99834	15
	1892	8,50	11,40	29,20	47,30	-46,23	0,06560	1,48296	3,61721	1,90190	0,99576	16
	2350	8,05	10,45	29,80	47,76	-46,65	0,85834	1,97059	6,30058	2,51010	0,99295	17
	2333	8,66	10,10	31,05	51,39	-46,56	0,80587	2,78483	13,44343	3,66653	0,98609	18
MLP2	5184	7,53	11,04	25,09	46,23	-45,75	0,10872	0,28069	0,19015	0,43606	0,99970	12
	3088	7,04	10,48	25,59	45,58	-45,48	0,09227	0,31315	0,23735	0,48718	0,99964	13
	3199	7,79	11,22	26,26	46,08	-45,84	0,05897	0,51482	0,48205	0,69430	0,99930	14
	2247	7,82	10,47	27,33	47,12	-46,29	0,04630	0,91572	1,31812	1,14810	0,99824	15
	1892	8,55	11,27	29,15	48,15	-46,26	0,02051	1,54177	3,79739	1,94869	0,99555	16
	2350	8,07	9,94	29,75	48,33	-47,35	0,83997	2,06189	6,75910	2,59983	0,99244	17
	2333	8,69	9,45	31,06	52,77	-47,84	0,77181	2,82262	13,26055	3,64150	0,98628	18
RF	5184	7,62	11,33	25,22	45,00	-44,99	0,01237	0,13807	0,09152	0,30251	0,99986	12
	3088	7,11	10,64	25,63	45,00	-44,99	0,01419	0,20529	0,15151	0,38925	0,99977	13
	3199	7,83	11,09	26,23	45,00	-44,99	0,01622	0,30713	0,22637	0,47579	0,99967	14
	2247	7,78	10,22	27,25	45,00	-45,00	0,08681	0,57732	0,71386	0,84490	0,99905	15
	1892	8,39	10,76	29,16	45,00	-45,00	0,17933	1,05560	2,40830	1,55187	0,99718	16
	2350	8,28	10,42	29,52	45,00	-45,00	0,62598	1,74200	6,30412	2,51080	0,99295	17
	2333	8,61	9,81	30,65	45,00	-45,00	0,86006	2,41719	11,96681	3,45931	0,98762	18
RFBase	5184	7,62	11,34	25,22	45,00	-44,99	0,01433	0,12674	0,09395	0,30651	0,99985	12
	3088	7,12	10,69	25,64	45,00	-45,00	0,01206	0,19110	0,15164	0,38941	0,99977	13
	3199	7,83	11,14	26,24	45,00	-45,00	0,01816	0,27665	0,20513	0,45291	0,99970	14
	2247	7,78	10,13	27,27	45,00	-45,00	0,08844	0,53202	0,66985	0,81844	0,99911	15
	1892	8,38	10,86	29,17	45,00	-45,00	0,18726	0,99528	2,30072	1,51681	0,99731	16
	2350	8,31	10,57	29,52	45,00	-45,00	0,59999	1,68931	6,29699	2,50938	0,99296	17
	2333	8,62	9,88	30,65	45,00	-45,00	0,84845	2,31337	11,56906	3,40133	0,98803	18

Tabela 93. Wyniki estymacji dla uśrednionych pomiarów prędkości kątowej modeli wyznaczonych na stanowisku obrotowym ortometru

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
Pomiary.ORT	5184	7,74	11,44	25,51	46,23	-45,54	0,09815	0,40452	0,23757	0,48741	0,99963	12
	3088	7,23	10,80	25,95	45,80	-45,40	0,10078	0,69920	0,58967	0,76790	0,99911	13
	3199	7,95	11,21	26,58	45,83	-45,65	0,10407	1,27797	1,89668	1,37720	0,99726	14
	2247	7,91	10,29	27,66	46,26	-45,62	0,04749	2,22871	6,16335	2,48261	0,99178	15
	1892	8,47	11,12	29,37	46,20	-46,08	-0,09848	3,59673	18,60131	4,31292	0,97822	16
	2350	7,75	10,02	29,87	45,68	-46,90	-1,16319	4,65014	30,76856	5,54694	0,96559	17
	2333	8,06	9,68	30,75	46,04	-46,87	-1,40368	6,01658	57,67498	7,59440	0,94031	18
EstRegWielORT	5184	7,63	11,29	25,27	46,17	-45,43	-0,00993	0,10511	0,02001	0,14146	0,99997	12
	3088	7,12	10,63	25,74	45,54	-45,50	-0,00794	0,15051	0,04096	0,20238	0,99994	13
	3199	7,84	11,10	26,44	46,14	-46,03	-0,00663	0,32258	0,19006	0,43595	0,99973	14
	2247	7,79	9,95	27,76	46,48	-46,17	-0,07211	0,70759	0,89464	0,94586	0,99881	15
	1892	8,50	10,44	29,85	46,50	-46,11	-0,06368	1,62108	4,82857	2,19740	0,99435	16
	2350	8,08	9,69	30,53	46,14	-48,96	-0,82717	2,87108	16,13184	4,01645	0,98196	17
	2333	3,68	3,30	30,60	45,91	-117,48	-5,78164	8,30078	224,09969	14,96996	0,76807	18
EstRegWielORTZmod	5184	7,63	11,29	25,27	46,17	-45,43	-0,00993	0,10510	0,02001	0,14144	0,99997	12
	3088	7,12	10,63	25,74	45,54	-45,50	-0,00796	0,15052	0,04097	0,20240	0,99994	13
	3199	7,84	11,10	26,44	46,14	-46,03	-0,00638	0,32236	0,18984	0,43570	0,99973	14
	2247	7,79	9,95	27,76	46,46	-46,19	-0,07865	0,71132	0,90170	0,94958	0,99880	15
	1892	8,54	10,62	29,82	46,57	-46,12	-0,02769	1,59461	4,72596	2,17393	0,99447	16
	2350	7,72	9,31	30,49	46,54	-47,14	-1,18715	3,21741	23,04760	4,80079	0,97422	17
	2333	6,89	7,43	29,88	59,63	-53,37	-2,57819	5,87591	69,07542	8,31116	0,92851	18
KNNBase	5184	7,63	11,38	25,23	45,00	-45,00	0,01216	0,13778	0,10641	0,32621	0,99983	12
	3088	7,10	10,72	25,64	45,00	-45,00	0,02378	0,22692	0,21698	0,46581	0,99967	13
	3199	7,81	11,10	26,29	45,00	-45,00	0,04080	0,38038	0,37589	0,61310	0,99946	14
	2247	7,70	10,11	27,42	45,00	-45,00	0,16991	0,71989	1,06732	1,03311	0,99858	15
	1892	8,49	10,42	29,87	45,00	-45,00	0,07773	1,77860	5,94935	2,43913	0,99303	16
	2350	8,12	9,41	30,61	45,00	-45,00	0,78765	2,39856	11,20554	3,34747	0,98747	17
	2333	8,31	10,58	31,74	45,00	-45,00	1,15707	3,09886	21,12899	4,59663	0,97813	18
MLP	5184	7,58	11,26	25,23	45,66	-45,54	0,06149	0,20997	0,11529	0,33954	0,99982	12
	3088	7,10	10,63	25,71	45,24	-45,59	0,02595	0,25266	0,14279	0,37787	0,99978	13
	3199	7,82	11,16	26,34	45,47	-45,97	0,03193	0,37523	0,26328	0,51311	0,99962	14
	2247	7,71	9,65	27,55	46,22	-46,24	0,15798	0,67038	0,78465	0,88581	0,99895	15
	1892	8,46	10,79	29,84	47,29	-46,21	0,11004	1,46772	3,80638	1,95100	0,99554	16
	2350	7,92	9,50	30,54	47,35	-46,40	0,99455	2,13114	8,49390	2,91443	0,99050	17
	2333	8,43	9,95	31,95	50,05	-46,06	1,03336	3,29771	20,24140	4,49904	0,97905	18
MLP2	5184	7,53	11,01	25,11	45,78	-45,46	0,11161	0,24671	0,14508	0,38089	0,99977	12
	3088	7,03	10,45	25,65	45,36	-45,48	0,09700	0,25152	0,14867	0,38557	0,99978	13
	3199	7,79	11,14	26,38	46,03	-45,86	0,05578	0,39765	0,29002	0,53854	0,99958	14
	2247	7,83	10,20	27,65	46,98	-46,30	0,03577	0,71851	0,86805	0,93169	0,99884	15
	1892	8,52	10,32	29,83	48,17	-46,14	0,04227	1,52822	3,96384	1,99094	0,99536	16
	2350	7,95	9,17	30,57	48,05	-47,36	0,96354	2,23062	8,78743	2,96436	0,99017	17
	2333	8,51	9,91	32,08	51,24	-47,79	0,95434	3,40558	20,31719	4,50746	0,97897	18
RF	5184	7,63	11,31	25,23	44,99	-44,99	0,01179	0,12509	0,07995	0,28276	0,99987	12
	3088	7,11	10,65	25,65	45,00	-44,99	0,01671	0,17393	0,14110	0,37563	0,99979	13
	3199	7,81	11,17	26,30	45,00	-44,99	0,03511	0,28588	0,19507	0,44167	0,99972	14
	2247	7,73	9,99	27,45	45,00	-45,00	0,13315	0,57736	0,71719	0,84687	0,99904	15
	1892	8,41	10,37	29,74	45,00	-45,00	0,15872	1,41008	4,09269	2,02304	0,99521	16
	2350	8,15	9,56	30,36	45,00	-45,00	0,75470	2,02279	8,90040	2,98335	0,99005	17
	2333	8,37	10,28	31,68	45,00	-45,00	1,09467	2,93061	19,09925	4,37027	0,98023	18
RFBase	5184	7,62	11,33	25,22	45,00	-44,99	0,01371	0,12224	0,09213	0,30353	0,99986	12
	3088	7,12	10,59	25,65	45,00	-45,00	0,01214	0,16934	0,14450	0,38013	0,99978	13
	3199	7,82	11,18	26,30	45,00	-45,00	0,03142	0,28183	0,20025	0,44749	0,99971	14
	2247	7,73	10,04	27,45	45,00	-45,00	0,13901	0,58184	0,74557	0,86347	0,99901	15
	1892	8,41	10,66	29,76	45,00	-45,00	0,15589	1,42927	4,21481	2,05300	0,99506	16

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
	2350	8,17	9,54	30,37	45,00	-45,00	0,73567	2,05647	9,14500	3,02407	0,98977	17
	2333	8,39	10,28	31,68	45,00	-45,00	1,07898	2,89607	18,80029	4,33593	0,98054	18

Tabela 94. Wyniki estymacji modeli na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji, na całym odcinku toru wzorcowego – pomiary kąta i prędkości kątowej nieuśrednione

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
Pomiary	4449	-1,37	-4,24	5,91	9,23	-10,85	0,84697	0,87119	0,99517	0,99758	0,97129	500
	4019	-1,24	-4,20	5,93	9,37	-9,70	0,87712	0,89592	1,03385	1,01678	0,97029	450
	3573	-1,32	-4,02	5,91	10,38	-9,78	0,88316	0,96400	1,30785	1,14362	0,96211	400
	3153	-1,26	-4,15	5,91	9,43	-10,35	0,90372	0,92940	1,12800	1,06207	0,96744	350
	2724	-1,23	-3,96	5,92	9,91	-10,33	0,89279	0,94385	1,24032	1,11370	0,96429	300
	2298	-1,28	-4,15	5,85	9,67	-10,03	0,85361	0,91073	1,13009	1,06306	0,96709	250
	1831	-1,13	-3,97	5,88	9,47	-10,26	0,83900	0,92663	1,19713	1,09413	0,96536	200
	1420	-1,05	-3,69	5,98	10,34	-10,49	0,81618	0,98529	1,50037	1,22490	0,95731	150
	986	-0,94	-3,53	6,04	11,97	-11,28	0,81242	1,04230	1,74749	1,32193	0,95102	100
	517	0,10	-0,73	6,39	17,52	-13,67	1,50408	2,22224	17,12065	4,13771	0,52188	50
EstRegWielORT	4449	-1,39	-4,14	5,87	9,92	-12,94	0,82587	0,87681	1,03524	1,01747	0,97013	500
	4019	-1,26	-4,04	5,89	10,10	-9,98	0,85442	0,89932	1,06263	1,03084	0,96947	450
	3573	-1,35	-3,69	5,92	11,69	-10,77	0,84883	1,11781	1,89751	1,37750	0,94503	400
	3153	-1,29	-4,00	5,88	11,37	-11,68	0,88073	0,92226	1,14993	1,07235	0,96681	350
	2724	-1,26	-3,49	5,93	10,51	-13,23	0,86503	1,05060	1,68789	1,29919	0,95140	300
	2298	-1,31	-3,98	5,84	10,43	-12,00	0,82564	0,92951	1,19115	1,09140	0,96532	250
	1831	-1,16	-3,70	5,90	10,97	-11,81	0,81299	0,99611	1,46093	1,20869	0,95773	200
	1420	-1,10	-2,97	6,11	12,61	-14,61	0,77361	1,25282	2,53405	1,59187	0,92790	150
	986	-0,97	-3,16	6,21	13,60	-15,28	0,78202	1,28800	2,86953	1,69397	0,91957	100
	517	-0,92	-0,13	17,86	28,02	-303,74	0,48131	4,00520	276,29449	16,62211	-6,71599	50
EstRegWielORTUzup	4449	-1,39	-4,14	5,87	9,92	-12,93	0,82585	0,87679	1,03520	1,01745	0,97013	500
	4019	-1,26	-4,04	5,89	10,10	-9,98	0,85439	0,89929	1,06257	1,03081	0,96947	450
	3573	-1,35	-3,69	5,92	11,69	-10,77	0,84884	1,11774	1,89716	1,37737	0,94504	400
	3153	-1,29	-4,00	5,88	11,37	-11,68	0,88070	0,92224	1,14993	1,07235	0,96681	350
	2724	-1,26	-3,49	5,93	10,51	-13,28	0,86506	1,05056	1,68790	1,29919	0,95140	300
	2298	-1,31	-3,98	5,84	10,43	-11,99	0,82565	0,92944	1,19104	1,09135	0,96532	250
	1831	-1,16	-3,70	5,90	10,97	-11,80	0,81300	0,99604	1,46065	1,20857	0,95773	200
	1420	-1,10	-2,97	6,11	12,61	-14,70	0,77357	1,25307	2,53645	1,59262	0,92784	150
	986	-0,97	-3,16	6,22	13,60	-15,37	0,78098	1,28971	2,88043	1,69718	0,91926	100
	517	0,19	0,12	7,46	27,85	-19,44	1,59523	3,09315	26,68196	5,16546	0,25486	50
KNNBase	4449	-1,38	-3,77	5,88	10,12	-14,40	-0,83619	0,92964	1,25283	1,11930	0,96386	500
	4019	-1,25	-3,64	5,89	10,18	-10,22	-0,86728	0,95427	1,29597	1,13841	0,96276	450
	3573	-1,35	-3,58	5,95	12,90	-11,49	-0,84901	1,16312	2,08705	1,44466	0,93954	400
	3153	-1,28	-3,64	5,88	14,19	-11,63	-0,88603	0,96386	1,34519	1,15982	0,96117	350
	2724	-1,28	-3,49	5,94	10,48	-13,11	-0,85042	1,08315	1,84049	1,35665	0,94700	300
	2298	-1,30	-3,64	5,84	10,27	-13,76	-0,83523	0,98411	1,41065	1,18771	0,95892	250
	1831	-1,15	-3,56	5,92	11,08	-13,76	-0,82242	1,05085	1,67939	1,29591	0,95140	200
	1420	-1,11	-2,81	6,15	14,19	-15,47	-0,76277	1,33165	2,82732	1,68146	0,91956	150
	986	-0,90	-3,23	6,22	14,19	-15,47	-0,84774	1,35359	3,30896	1,81905	0,90725	100
	517	0,19	-0,04	7,63	30,37	-20,19	-1,59247	3,20258	30,44401	5,51761	0,14980	50
MLP	4449	-1,50	-4,19	5,92	9,88	-12,58	-0,71341	0,79208	0,90812	0,95295	0,97380	500
	4019	-1,37	-4,05	5,93	10,07	-10,12	-0,74416	0,81529	0,94246	0,97080	0,97292	450

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
	3573	-1,42	-3,71	5,97	11,40	-10,76	-0,77745	1,06435	1,78202	1,33492	0,94838	400
	3153	-1,39	-4,01	5,92	10,90	-11,71	-0,77549	0,84433	1,02297	1,01142	0,97047	350
	2724	-1,33	-3,50	5,95	10,51	-12,57	-0,80209	1,01503	1,63062	1,27696	0,95305	300
	2298	-1,40	-4,01	5,87	10,27	-11,57	-0,73368	0,86709	1,08140	1,03990	0,96851	250
	1831	-1,22	-3,70	5,93	10,64	-11,60	-0,74574	0,94795	1,36074	1,16651	0,96062	200
	1420	-1,11	-2,92	6,11	12,07	-14,14	-0,75680	1,22398	2,43164	1,55937	0,93082	150
	986	-0,98	-3,13	6,20	13,27	-14,73	-0,77426	1,26129	2,79118	1,67068	0,92176	100
	517	0,25	-0,16	7,49	31,43	-18,44	-1,64985	3,10126	29,24257	5,40764	0,18335	50
MLP2	4449	-1,54	-4,23	5,83	9,72	-13,39	-0,67034	0,76321	0,85071	0,92234	0,97546	500
	4019	-1,41	-4,11	5,85	9,88	-10,09	-0,70081	0,78766	0,87853	0,93730	0,97476	450
	3573	-1,46	-3,78	5,93	11,66	-11,00	-0,74077	1,05402	1,74278	1,32015	0,94951	400
	3153	-1,44	-4,08	5,84	11,11	-12,00	-0,72785	0,80828	0,95635	0,97793	0,97240	350
	2724	-1,40	-3,59	5,92	10,24	-13,96	-0,72925	0,98158	1,54737	1,24393	0,95544	300
	2298	-1,45	-4,07	5,82	10,31	-12,55	-0,68719	0,84288	1,03954	1,01958	0,96973	250
	1831	-1,27	-3,80	5,90	10,91	-12,40	-0,69699	0,93090	1,33521	1,15551	0,96136	200
	1420	-1,19	-2,97	6,13	12,19	-15,39	-0,67712	1,23733	2,52256	1,58826	0,92823	150
	986	-1,06	-3,19	6,25	13,44	-16,08	-0,68855	1,27037	2,89085	1,70025	0,91897	100
	517	0,13	-0,21	7,59	29,31	-18,49	-1,53492	3,17084	29,33237	5,41594	0,18084	50
RF	4449	-1,39	-3,97	5,92	10,07	-13,60	-0,82480	0,90964	1,18981	1,09079	0,96567	500
	4019	-1,26	-3,78	5,93	10,02	-10,05	-0,84859	0,92442	1,21148	1,10067	0,96519	450
	3573	-1,37	-3,63	5,95	11,57	-11,05	-0,83315	1,13302	1,97495	1,40533	0,94279	400
	3153	-1,29	-3,78	5,91	11,14	-11,38	-0,87362	0,94340	1,26971	1,12681	0,96335	350
	2724	-1,26	-3,45	5,96	10,43	-13,04	-0,86696	1,08021	1,80058	1,34186	0,94815	300
	2298	-1,31	-3,76	5,87	10,36	-12,33	-0,82525	0,96273	1,32741	1,15213	0,96135	250
	1831	-1,16	-3,64	5,93	10,78	-12,07	-0,81311	1,02524	1,57749	1,25598	0,95435	200
	1420	-1,10	-3,10	6,12	12,56	-14,96	-0,77231	1,26965	2,55195	1,59748	0,92739	150
	986	-0,94	-3,22	6,22	13,49	-14,99	-0,81220	1,31527	3,07712	1,75417	0,91375	100
	517	0,19	-0,24	7,63	28,44	-19,43	-1,59740	3,17948	30,01338	5,47845	0,16183	50
RFBase	4449	-1,39	-3,95	5,92	10,14	-13,90	-0,82495	0,91046	1,19258	1,09205	0,96559	500
	4019	-1,26	-3,77	5,92	10,03	-10,08	-0,84878	0,92603	1,21585	1,10266	0,96507	450
	3573	-1,37	-3,64	5,95	11,63	-11,18	-0,83081	1,13416	1,97627	1,40580	0,94275	400
	3153	-1,29	-3,76	5,91	10,98	-11,36	-0,87541	0,94471	1,27391	1,12868	0,96323	350
	2724	-1,26	-3,47	5,96	10,45	-13,26	-0,86662	1,08377	1,80998	1,34536	0,94788	300
	2298	-1,31	-3,75	5,87	10,36	-12,45	-0,82567	0,96486	1,33326	1,15467	0,96118	250
	1831	-1,16	-3,65	5,93	10,61	-12,20	-0,81311	1,02601	1,58313	1,25822	0,95419	200
	1420	-1,10	-3,08	6,12	12,68	-14,75	-0,77112	1,27312	2,56084	1,60026	0,92714	150
	986	-0,94	-3,30	6,23	13,29	-15,28	-0,81437	1,32240	3,13031	1,76927	0,91226	100
	517	0,20	-0,24	7,65	28,32	-19,82	-1,60448	3,19428	30,20327	5,49575	0,15652	50

Tabela 95. Wyniki estymacji modeli na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji, na odcinkach toru wzorcowego o zmiennym kącie – pomiary kąta i prędkości kątowej nieuśrednione

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
Pomiary	1774	-1,14	-2,10	5,49	8,94	-10,85	0,82295	0,87439	1,07415	1,03641	0,96275	500
	1606	-1,01	-1,90	5,49	8,93	-9,70	0,86019	0,90023	1,12395	1,06016	0,96111	450
	1286	-1,04	-2,02	5,52	9,21	-10,35	0,86583	0,92339	1,21773	1,10351	0,95843	350
	922	-1,29	-2,23	5,43	8,88	-10,03	0,82817	0,95589	1,35420	1,16370	0,95288	250
	1121	-1,07	-1,82	5,49	9,00	-10,33	0,86845	0,97156	1,40648	1,18595	0,95150	300
	1455	-1,17	-2,11	5,47	9,45	-9,78	0,86041	0,97826	1,37237	1,17148	0,95220	400
	748	-1,03	-2,05	5,54	9,41	-10,26	0,81122	0,99318	1,47037	1,21259	0,95001	200
	603	-1,23	-1,98	5,59	10,34	-10,49	0,79628	1,11534	1,95004	1,39644	0,93404	150
	428	-1,11	-2,00	5,74	10,09	-11,28	0,80909	1,26797	2,66407	1,63220	0,91283	100
	243	-0,57	-1,35	6,22	14,90	-13,67	1,49966	2,73537	19,63094	4,43068	0,37393	50
EstRegWielORT	1774	-1,17	-2,13	5,45	9,12	-12,94	0,79738	0,86241	1,02957	1,01468	0,96429	500
	1606	-1,03	-1,92	5,46	9,28	-9,94	0,83435	0,87945	1,03281	1,01627	0,96427	450
	1286	-1,07	-2,09	5,51	9,31	-11,68	0,83144	0,88540	1,10336	1,05041	0,96234	350
	922	-1,32	-2,25	5,47	9,55	-12,00	0,79479	0,94742	1,23880	1,11301	0,95690	250
	748	-1,05	-2,21	5,63	10,61	-11,81	0,79125	1,01709	1,53107	1,23736	0,94794	200
	1121	-1,11	-1,92	5,53	10,10	-12,84	0,83513	1,06620	1,73366	1,31668	0,94022	300
	1455	-1,21	-2,09	5,50	10,53	-10,77	0,82080	1,07869	1,70452	1,30557	0,94063	400
	603	-1,29	-2,22	5,82	12,61	-14,61	0,73520	1,26260	2,61038	1,61567	0,91170	150
	428	-1,14	-2,04	6,11	12,01	-15,28	0,78077	1,51078	3,89053	1,97244	0,87269	100
	243	-1,39	-1,33	15,51	28,02	-209,26	0,67368	4,58376	212,04577	14,56179	-5,76251	50
EstRegWielORTUzup	1774	-1,17	-2,13	5,45	9,12	-12,93	0,79736	0,86239	1,02950	1,01464	0,96430	500
	1606	-1,03	-1,92	5,46	9,28	-9,94	0,83432	0,87943	1,03273	1,01623	0,96427	450
	1286	-1,07	-2,09	5,51	9,31	-11,68	0,83142	0,88538	1,10341	1,05043	0,96234	350
	922	-1,32	-2,25	5,47	9,55	-11,99	0,79483	0,94728	1,23865	1,11295	0,95690	250
	748	-1,05	-2,21	5,63	10,61	-11,80	0,79130	1,01693	1,53058	1,23717	0,94796	200
	1121	-1,11	-1,92	5,53	10,10	-12,84	0,83525	1,06607	1,73348	1,31662	0,94022	300
	1455	-1,21	-2,09	5,50	10,54	-10,77	0,82076	1,07865	1,70435	1,30551	0,94064	400
	603	-1,29	-2,22	5,83	12,61	-14,70	0,73505	1,26335	2,61698	1,61771	0,91148	150
	428	-1,14	-2,04	6,11	12,01	-15,37	0,77896	1,51399	3,90966	1,97729	0,87207	100
	243	-0,41	-1,04	7,75	27,85	-19,44	1,65318	3,74368	34,49125	5,87293	-0,09999	50
KNNBase	1774	-1,16	-2,16	5,48	9,08	-14,40	-0,80486	0,90611	1,17060	1,08194	0,95940	500
	1286	-1,07	-2,13	5,53	9,81	-11,63	-0,83611	0,92357	1,21253	1,10115	0,95861	350
	1606	-1,03	-1,95	5,49	9,47	-10,22	-0,83717	0,92629	1,17147	1,08234	0,95947	450
	922	-1,32	-2,25	5,49	9,88	-13,76	-0,79155	0,98433	1,38318	1,17609	0,95187	250
	748	-1,04	-2,12	5,65	10,67	-13,76	-0,79707	1,07651	1,72539	1,31354	0,94134	200
	1121	-1,11	-2,03	5,55	9,84	-13,11	-0,82808	1,11870	1,93352	1,39051	0,93332	300
	1455	-1,20	-2,15	5,54	10,67	-11,49	-0,83034	1,13174	1,89432	1,37634	0,93402	400
	603	-1,31	-2,16	5,84	14,19	-15,47	-0,72162	1,32706	2,84512	1,68675	0,90376	150
	428	-1,03	-1,90	6,14	14,19	-15,47	-0,88824	1,58015	4,63829	2,15367	0,84822	100
	243	-0,50	-1,28	7,82	25,42	-20,19	-1,56518	3,85175	35,39257	5,94917	-0,12873	50
MLP	1774	-1,27	-2,27	5,49	9,17	-12,58	-0,69263	0,78187	0,89296	0,94497	0,96903	500
	1606	-1,13	-2,05	5,49	9,30	-10,11	-0,73287	0,80641	0,90701	0,95237	0,96862	450
	1286	-1,16	-2,19	5,53	9,43	-11,71	-0,74529	0,82112	0,98422	0,99208	0,96641	350
	922	-1,39	-2,32	5,47	9,50	-11,57	-0,72136	0,89178	1,11278	1,05488	0,96128	250
	748	-1,10	-2,20	5,62	10,37	-11,60	-0,74020	0,98223	1,41988	1,19159	0,95172	200
	1121	-1,16	-1,98	5,52	9,92	-12,26	-0,77769	1,02359	1,63038	1,27686	0,94378	300
	1455	-1,28	-2,16	5,54	10,41	-10,76	-0,75204	1,04205	1,62671	1,27543	0,94334	400
	603	-1,30	-2,21	5,78	12,07	-14,14	-0,72346	1,21727	2,42604	1,55758	0,91794	150

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
	428	-1,11	-2,00	6,05	11,49	-14,73	-0,80319	1,47486	3,78552	1,94564	0,87613	100
	243	-0,50	-1,60	7,50	23,71	-18,44	-1,56394	3,62675	31,66982	5,62759	-0,01001	50
MLP2	1774	-1,32	-2,36	5,42	8,88	-13,39	-0,64556	0,74766	0,84530	0,91940	0,97068	500
	1606	-1,18	-2,12	5,43	9,06	-10,06	-0,68232	0,77144	0,84843	0,92110	0,97065	450
	1286	-1,21	-2,25	5,48	9,04	-12,00	-0,69384	0,78133	0,93716	0,96807	0,96801	350
	922	-1,44	-2,40	5,46	9,37	-12,55	-0,67322	0,86411	1,10773	1,05249	0,96146	250
	748	-1,15	-2,34	5,64	10,54	-12,40	-0,69540	0,97741	1,46885	1,21196	0,95006	200
	1121	-1,23	-2,05	5,53	9,95	-13,41	-0,71360	1,01172	1,62808	1,27596	0,94386	300
	1455	-1,32	-2,18	5,51	10,40	-11,00	-0,71223	1,03685	1,61943	1,27257	0,94359	400
	603	-1,38	-2,34	5,87	12,19	-15,39	-0,64303	1,25963	2,67140	1,63444	0,90964	150
	428	-1,22	-1,96	6,18	11,69	-16,08	-0,70090	1,52390	4,10981	2,02727	0,86552	100
	243	-0,60	-1,48	7,69	24,61	-18,49	-1,46490	3,73859	32,75549	5,72324	-0,04463	50
RF	1774	-1,17	-2,10	5,46	9,15	-13,60	-0,79382	0,88489	1,08604	1,04213	0,96233	500
	1606	-1,04	-1,95	5,47	9,30	-10,01	-0,82330	0,90204	1,08454	1,04141	0,96248	450
	1286	-1,07	-2,08	5,52	9,55	-11,38	-0,83085	0,90819	1,13419	1,06498	0,96129	350
	922	-1,32	-2,25	5,47	9,86	-12,33	-0,79469	0,97011	1,27441	1,12890	0,95566	250
	748	-1,05	-2,19	5,63	10,34	-12,07	-0,78847	1,04133	1,56325	1,25030	0,94685	200
	1455	-1,23	-2,06	5,53	10,40	-11,05	-0,80519	1,09625	1,78004	1,33418	0,93800	400
	1121	-1,10	-2,02	5,53	10,06	-13,04	-0,83814	1,10469	1,83042	1,35293	0,93688	300
	603	-1,30	-2,09	5,80	12,56	-14,96	-0,72852	1,26997	2,59447	1,61073	0,91224	150
	428	-1,10	-1,99	6,10	11,60	-14,99	-0,82012	1,53498	4,23887	2,05885	0,86129	100
	243	-0,52	-1,60	7,78	26,39	-19,43	-1,54290	3,79876	34,23407	5,85099	-0,09178	50
RFBaSe	1774	-1,18	-2,09	5,46	9,18	-13,90	-0,79024	0,88298	1,08565	1,04194	0,96235	500
	1606	-1,05	-1,99	5,47	9,31	-10,04	-0,82030	0,90163	1,08610	1,04216	0,96242	450
	1286	-1,08	-2,07	5,52	9,55	-11,36	-0,82807	0,90515	1,13108	1,06352	0,96139	350
	922	-1,32	-2,24	5,47	9,85	-12,45	-0,79316	0,96885	1,27429	1,12885	0,95566	250
	748	-1,05	-2,18	5,63	10,32	-12,20	-0,78640	1,04048	1,56648	1,25159	0,94674	200
	1455	-1,23	-2,05	5,53	10,49	-11,18	-0,80194	1,09498	1,77734	1,33317	0,93809	400
	1121	-1,11	-1,99	5,53	10,04	-13,26	-0,83507	1,10678	1,84022	1,35655	0,93654	300
	603	-1,30	-2,09	5,80	12,68	-14,75	-0,72758	1,27305	2,60894	1,61522	0,91175	150
	428	-1,09	-1,97	6,12	11,57	-15,28	-0,82298	1,54743	4,36094	2,08829	0,85730	100
	243	-0,51	-1,60	7,81	26,45	-19,82	-1,55289	3,82554	34,69602	5,89033	-0,10652	50

Tabela 96. Wyniki estymacji modeli na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji, na odcinkach toru wzorcowego o stałym kącie – pomiary kąta i prędkości kątowej nieuśrednione

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
Pomiary	2675	-1,52	-4,46	6,18	9,23	-9,74	0,86290	0,86908	0,94279	0,97098	0,97549	500
	2413	-1,39	-4,43	6,20	9,37	-9,61	0,88838	0,89304	0,97389	0,98686	0,97481	450
	2118	-1,42	-4,33	6,19	10,38	-9,77	0,89880	0,95421	1,26353	1,12407	0,96716	400
	1867	-1,42	-4,38	6,16	9,43	-9,85	0,92982	0,93354	1,06620	1,03257	0,97213	350
	1603	-1,35	-4,34	6,20	9,91	-10,06	0,90982	0,92447	1,12412	1,06025	0,97095	300
	1376	-1,28	-4,37	6,12	9,67	-9,72	0,87066	0,88048	0,97993	0,98991	0,97428	250
	1083	-1,20	-4,34	6,11	9,47	-9,94	0,85818	0,88066	1,00841	1,00420	0,97353	200
	817	-0,92	-4,08	6,26	10,01	-10,47	0,83087	0,88930	1,16848	1,08096	0,97022	150
	558	-0,81	-4,20	6,26	11,97	-10,47	0,81498	0,86920	1,04446	1,02199	0,97360	100
	274	0,69	0,26	6,50	17,52	-10,88	1,50800	1,76717	14,89438	3,85932	0,61832	50
EstRegWielORT	2675	-1,53	-4,42	6,13	9,92	-10,26	0,84477	0,88636	1,03901	1,01932	0,97298	500
	2413	-1,41	-4,36	6,15	10,10	-9,98	0,86777	0,91254	1,08247	1,04042	0,97200	450
	2118	-1,45	-4,15	6,20	11,69	-10,46	0,86809	1,14468	2,03009	1,42481	0,94724	400
	1867	-1,43	-4,28	6,12	11,37	-10,20	0,91468	0,94765	1,18201	1,08720	0,96910	350
	1603	-1,37	-4,02	6,20	10,51	-13,23	0,88594	1,03969	1,65589	1,28681	0,95721	300
	1376	-1,31	-4,26	6,08	10,43	-10,39	0,84632	0,91751	1,15922	1,07667	0,96957	250
	1083	-1,23	-4,14	6,09	10,97	-10,62	0,82801	0,98162	1,41248	1,18848	0,96292	200
	817	-0,95	-3,32	6,32	11,56	-11,76	0,80195	1,24561	2,47772	1,57408	0,93686	150
	558	-0,84	-3,67	6,30	13,60	-13,22	0,78297	1,11711	2,08639	1,44444	0,94726	100
	274	-0,51	0,23	19,73	25,85	-303,74	0,31070	3,49210	333,27419	18,25580	-7,54041	50
EstRegWielORTUzup	2675	-1,53	-4,42	6,13	9,92	-10,26	0,84474	0,88634	1,03897	1,01930	0,97299	500
	2413	-1,41	-4,36	6,15	10,10	-9,98	0,86774	0,91251	1,08244	1,04040	0,97200	450
	2118	-1,45	-4,15	6,20	11,69	-10,46	0,86813	1,14460	2,02960	1,42464	0,94725	400
	1867	-1,43	-4,28	6,12	11,37	-10,20	0,91465	0,94762	1,18197	1,08718	0,96910	350
	1603	-1,37	-4,02	6,20	10,51	-13,28	0,88590	1,03971	1,65603	1,28687	0,95720	300
	1376	-1,31	-4,26	6,08	10,43	-10,39	0,84630	0,91748	1,15914	1,07663	0,96957	250
	1083	-1,23	-4,14	6,09	10,97	-10,62	0,82799	0,98160	1,41235	1,18842	0,96292	200
	817	-0,95	-3,32	6,32	11,56	-11,76	0,80199	1,24548	2,47701	1,57385	0,93687	150
	558	-0,84	-3,67	6,30	13,60	-13,24	0,78253	1,11767	2,09099	1,44603	0,94715	100
	274	0,73	0,30	7,15	25,76	-14,93	1,54384	2,51621	19,75620	4,44480	0,49373	50
KNNBase	2675	-1,52	-4,31	6,12	10,12	-10,20	-0,85696	0,94524	1,30736	1,14340	0,96601	500
	2413	-1,39	-4,07	6,13	10,18	-10,18	-0,88731	0,97290	1,37884	1,17424	0,96434	450
	2118	-1,45	-4,07	6,22	12,90	-10,86	-0,86184	1,18468	2,21945	1,48978	0,94232	400
	1867	-1,43	-4,07	6,10	14,19	-10,54	-0,92042	0,99160	1,43656	1,19857	0,96244	350
	1603	-1,39	-3,96	6,20	10,48	-12,53	-0,86605	1,05830	1,77543	1,33245	0,95412	300
	1376	-1,29	-3,99	6,07	10,27	-10,43	-0,86449	0,98396	1,42905	1,19543	0,96249	250
	1083	-1,22	-3,96	6,10	11,08	-10,86	-0,83993	1,03313	1,64762	1,28360	0,95675	200
	817	-0,96	-3,36	6,36	11,68	-13,76	-0,79314	1,33504	2,81418	1,67755	0,92828	150
	558	-0,81	-3,57	6,29	13,29	-13,69	-0,81667	1,17981	2,28932	1,51305	0,94213	100
	274	0,80	0,00	7,40	30,37	-15,75	-1,61668	2,62685	26,05534	5,10444	0,33231	50
MLP	2675	-1,65	-4,54	6,18	9,88	-10,36	-0,72720	0,79886	0,91817	0,95821	0,97613	500
	2413	-1,52	-4,44	6,20	10,07	-10,12	-0,75167	0,82120	0,96605	0,98288	0,97501	450
	2118	-1,52	-4,20	6,25	11,40	-10,53	-0,79491	1,07967	1,88872	1,37431	0,95091	400
	1867	-1,55	-4,38	6,16	10,90	-10,29	-0,79628	0,86032	1,04967	1,02453	0,97256	350
	1603	-1,44	-4,03	6,23	10,51	-12,57	-0,81914	1,00904	1,63079	1,27702	0,95786	300
	1376	-1,41	-4,31	6,12	10,27	-10,46	-0,74193	0,85055	1,06038	1,02975	0,97217	250
	1083	-1,31	-4,17	6,13	10,64	-10,69	-0,74956	0,92428	1,31990	1,14887	0,96535	200
	817	-0,97	-3,28	6,34	11,27	-11,81	-0,78141	1,22893	2,43578	1,56070	0,93792	150

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
	558	-0,87	-3,66	6,31	13,27	-12,54	-0,75208	1,09747	2,02849	1,42425	0,94873	100
	274	0,91	0,24	7,42	31,43	-15,35	-1,72605	2,63521	27,08994	5,20480	0,30580	50
MLP2	2675	-1,69	-4,57	6,08	9,72	-10,39	-0,68677	0,77352	0,85429	0,92428	0,97779	500
	2413	-1,56	-4,47	6,10	9,88	-10,09	-0,71312	0,79846	0,89857	0,94793	0,97676	450
	2118	-1,56	-4,28	6,20	11,66	-10,60	-0,76038	1,06581	1,82752	1,35186	0,95250	400
	1867	-1,60	-4,39	6,07	11,11	-10,34	-0,75127	0,82685	0,96956	0,98466	0,97465	350
	1603	-1,52	-4,12	6,17	10,24	-13,96	-0,74019	0,96050	1,49093	1,22104	0,96147	300
	1376	-1,46	-4,34	6,04	10,31	-10,57	-0,69655	0,82866	0,99385	0,99692	0,97391	250
	1083	-1,36	-4,25	6,07	10,91	-10,77	-0,69810	0,89877	1,24290	1,11485	0,96737	200
	817	-1,05	-3,36	6,32	11,52	-12,30	-0,70228	1,22087	2,41270	1,55329	0,93851	150
	558	-0,95	-3,73	6,30	13,44	-13,88	-0,67908	1,07591	1,95587	1,39852	0,95056	100
	274	0,78	0,52	7,44	29,31	-15,07	-1,59703	2,66733	26,29653	5,12801	0,32613	50
RF	2675	-1,53	-4,13	6,19	10,07	-10,13	-0,84535	0,92606	1,25864	1,12189	0,96727	500
	2413	-1,41	-4,11	6,20	10,02	-10,05	-0,86543	0,93932	1,29598	1,13841	0,96648	450
	2118	-1,46	-3,98	6,22	11,57	-10,44	-0,85236	1,15827	2,10884	1,45219	0,94519	400
	1867	-1,45	-4,01	6,17	11,14	-10,29	-0,90309	0,96766	1,36306	1,16750	0,96436	350
	1603	-1,37	-3,88	6,24	10,43	-12,23	-0,88712	1,06310	1,77971	1,33406	0,95401	300
	1376	-1,31	-3,98	6,12	10,36	-10,32	-0,84572	0,95778	1,36293	1,16744	0,96422	250
	1083	-1,23	-3,97	6,12	10,78	-10,60	-0,83013	1,01412	1,58733	1,25989	0,95833	200
	817	-0,95	-3,36	6,34	11,36	-12,11	-0,80463	1,26941	2,52057	1,58763	0,93576	150
	558	-0,82	-3,63	6,31	13,49	-13,70	-0,80613	1,14674	2,18602	1,47852	0,94474	100
	274	0,83	0,00	7,44	28,44	-15,74	-1,64574	2,63026	26,27021	5,12545	0,32681	50
RFBBase	2675	-1,53	-4,12	6,20	10,14	-10,24	-0,84797	0,92869	1,26350	1,12405	0,96715	500
	2413	-1,41	-4,11	6,20	10,03	-10,08	-0,86773	0,94228	1,30221	1,14115	0,96632	450
	2118	-1,47	-3,97	6,22	11,63	-10,50	-0,85064	1,16108	2,11293	1,45359	0,94509	400
	1867	-1,44	-3,99	6,17	10,98	-10,30	-0,90801	0,97196	1,37230	1,17145	0,96412	350
	1603	-1,37	-3,88	6,24	10,45	-12,08	-0,88869	1,06768	1,78884	1,33747	0,95377	300
	1376	-1,31	-3,97	6,12	10,36	-10,43	-0,84746	0,96218	1,37276	1,17165	0,96397	250
	1083	-1,22	-3,95	6,12	10,61	-10,65	-0,83156	1,01602	1,59462	1,26278	0,95814	200
	817	-0,95	-3,37	6,34	11,29	-12,26	-0,80325	1,27317	2,52534	1,58913	0,93564	150
	558	-0,82	-3,62	6,31	13,29	-13,65	-0,80777	1,14980	2,18638	1,47864	0,94474	100
	274	0,83	0,00	7,44	28,32	-15,75	-1,65024	2,63443	26,21883	5,12043	0,32812	50

Tabela 97. Wyniki estymacji modeli na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji, na całym odcinku toru wzorcowego – pomiary kąta nieuśrednione, prędkość kątowa uśrednione

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
Pomiary	4449	-1,37	-4,24	5,91	9,23	-10,85	0,84697	0,87119	0,99517	0,99758	0,97129	500
	4019	-1,24	-4,20	5,93	9,37	-9,70	0,87712	0,89592	1,03385	1,01678	0,97029	450
	3573	-1,32	-4,02	5,91	10,38	-9,78	0,88316	0,96400	1,30785	1,14362	0,96211	400
	3153	-1,26	-4,15	5,91	9,43	-10,35	0,90372	0,92940	1,12800	1,06207	0,96744	350
	2724	-1,23	-3,96	5,92	9,91	-10,33	0,89279	0,94385	1,24032	1,11370	0,96429	300
	2298	-1,28	-4,15	5,85	9,67	-10,03	0,85361	0,91073	1,13009	1,06306	0,96709	250
	1831	-1,13	-3,97	5,88	9,47	-10,26	0,83900	0,92663	1,19713	1,09413	0,96536	200
	1420	-1,05	-3,69	5,98	10,34	-10,49	0,81618	0,98529	1,50037	1,22490	0,95731	150
	986	-0,94	-3,53	6,04	11,97	-11,28	0,81242	1,04230	1,74749	1,32193	0,95102	100
	517	0,10	-0,73	6,39	17,52	-13,67	1,50408	2,22224	17,12065	4,13771	0,52188	50
EstRegWielORT	4449	-1,39	-4,16	5,87	9,38	-11,49	0,82684	0,85099	0,95469	0,97708	0,97246	500
	4019	-1,26	-4,11	5,89	9,51	-9,81	0,85699	0,87414	0,96753	0,98363	0,97220	450
	3573	-1,34	-3,83	5,91	11,29	-10,68	0,85701	1,02926	1,55888	1,24855	0,95484	400
	3153	-1,28	-4,07	5,89	9,66	-10,71	0,88250	0,90278	1,06063	1,02987	0,96939	350
	2724	-1,26	-3,84	5,92	10,34	-11,34	0,87012	0,94421	1,26195	1,12336	0,96366	300
	2298	-1,31	-4,02	5,86	9,76	-11,45	0,82810	0,88163	1,05974	1,02944	0,96914	250
	1831	-1,15	-3,88	5,92	9,95	-11,47	0,81579	0,91357	1,20123	1,09601	0,96524	200
	1420	-1,09	-3,52	6,09	11,22	-12,46	0,78481	1,01622	1,62924	1,27642	0,95365	150
	986	-0,97	-3,51	6,26	12,41	-14,13	0,78164	1,10386	2,00938	1,41753	0,94368	100
	517	0,07	0,10	7,12	22,88	-16,27	1,47673	2,54850	20,87689	4,56912	0,41698	50
EstRegWielORTUzup	4449	-1,39	-4,16	5,87	9,38	-11,49	0,82681	0,85096	0,95465	0,97706	0,97246	500
	4019	-1,26	-4,11	5,89	9,51	-9,81	0,85696	0,87411	0,96749	0,98361	0,97220	450
	3573	-1,34	-3,83	5,91	11,29	-10,68	0,85698	1,02924	1,55888	1,24855	0,95484	400
	3153	-1,29	-4,07	5,89	9,66	-10,71	0,88246	0,90275	1,06058	1,02985	0,96939	350
	2724	-1,26	-3,84	5,92	10,34	-11,34	0,87009	0,94418	1,26186	1,12333	0,96367	300
	2298	-1,31	-4,02	5,86	9,76	-11,45	0,82806	0,88159	1,05964	1,02939	0,96915	250
	1831	-1,15	-3,88	5,92	9,95	-11,46	0,81580	0,91350	1,20100	1,09590	0,96525	200
	1420	-1,09	-3,52	6,09	11,22	-12,45	0,78482	1,01628	1,62994	1,27669	0,95363	150
	986	-0,97	-3,51	6,26	12,41	-14,23	0,78143	1,10454	2,01348	1,41897	0,94356	100
	517	0,07	0,10	7,13	22,89	-16,18	1,47557	2,55017	20,89853	4,57149	0,41637	50
KNNBase	4449	-1,38	-3,64	5,88	9,86	-11,80	-0,83544	0,91063	1,20058	1,09571	0,96536	500
	4019	-1,24	-3,64	5,87	10,03	-10,18	-0,87181	0,93520	1,23617	1,11183	0,96448	450
	3573	-1,33	-3,49	5,91	11,33	-11,01	-0,87252	1,10739	1,85169	1,36077	0,94636	400
	3153	-1,27	-3,64	5,88	10,27	-10,65	-0,89904	0,96010	1,32836	1,15255	0,96166	350
	2724	-1,25	-3,51	5,91	10,43	-11,59	-0,88223	1,01176	1,52650	1,23551	0,95605	300
	2298	-1,28	-3,64	5,86	10,22	-11,36	-0,85755	0,95976	1,33990	1,15754	0,96098	250
	1831	-1,12	-3,54	5,92	10,27	-12,75	-0,84820	0,99474	1,49960	1,22458	0,95661	200
	1420	-1,08	-3,21	6,10	10,71	-13,76	-0,79074	1,08257	1,86972	1,36738	0,94680	150
	986	-0,96	-3,23	6,28	12,26	-14,57	-0,78835	1,15993	2,27433	1,50809	0,93625	100
	517	0,08	0,00	7,23	23,91	-18,04	-1,48951	2,62815	21,57171	4,64454	0,39757	50
MLP	4449	-1,51	-4,20	5,92	9,46	-11,57	-0,70440	0,76063	0,82006	0,90557	0,97634	500
	4019	-1,38	-4,16	5,93	9,59	-10,02	-0,73608	0,77754	0,82980	0,91094	0,97616	450
	3573	-1,44	-3,84	5,96	11,16	-10,70	-0,75939	0,98475	1,49327	1,22199	0,95674	400
	3153	-1,40	-4,10	5,93	9,73	-10,85	-0,76978	0,81498	0,92455	0,96154	0,97331	350
	2724	-1,36	-3,86	5,95	10,37	-11,35	-0,77153	0,88615	1,15937	1,07674	0,96662	300
	2298	-1,41	-4,04	5,90	9,87	-11,31	-0,73078	0,81751	0,95881	0,97919	0,97208	250
	1831	-1,24	-3,89	5,95	9,97	-11,21	-0,72794	0,86347	1,10847	1,05284	0,96792	200
	1420	-1,16	-3,52	6,10	11,15	-12,05	-0,71182	0,97860	1,52074	1,23318	0,95673	150

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
	986	-1,02	-3,48	6,26	12,43	-13,66	-0,72980	1,06094	1,88162	1,37172	0,94726	100
	517	0,09	0,05	7,09	23,38	-16,13	-1,49520	2,53428	20,81056	4,56186	0,41883	50
MLP2	4449	-1,55	-4,22	5,82	9,10	-11,64	-0,66628	0,73264	0,76636	0,87542	0,97789	500
	4019	-1,42	-4,17	5,84	9,22	-9,94	-0,69727	0,74850	0,77500	0,88034	0,97773	450
	3573	-1,48	-3,92	5,87	11,25	-10,85	-0,71723	0,96578	1,41691	1,19034	0,95895	400
	3153	-1,44	-4,12	5,84	9,40	-10,84	-0,72768	0,78015	0,86513	0,93012	0,97503	350
	2724	-1,40	-3,92	5,88	10,04	-11,63	-0,72429	0,85326	1,10160	1,04957	0,96828	300
	2298	-1,45	-4,08	5,82	9,46	-11,83	-0,68877	0,79310	0,91402	0,95604	0,97339	250
	1831	-1,29	-3,93	5,89	9,69	-11,98	-0,68087	0,84198	1,07424	1,03646	0,96891	200
	1420	-1,22	-3,57	6,07	11,12	-12,97	-0,64990	0,96950	1,52646	1,23550	0,95657	150
	986	-1,09	-3,55	6,27	12,31	-14,97	-0,65689	1,06763	1,97916	1,40683	0,94452	100
	517	0,00	0,16	7,17	23,06	-16,27	-1,40407	2,55427	20,94773	4,57687	0,41500	50
RF	4449	-1,39	-3,91	5,93	9,57	-11,56	-0,82145	0,88597	1,12354	1,05997	0,96759	500
	4019	-1,26	-3,78	5,94	9,70	-10,01	-0,85440	0,90282	1,13883	1,06716	0,96728	450
	3573	-1,36	-3,66	5,94	11,27	-10,74	-0,84324	1,06892	1,72682	1,31408	0,94998	400
	3153	-1,29	-3,77	5,93	9,76	-10,72	-0,87730	0,92823	1,22032	1,10468	0,96478	350
	2724	-1,24	-3,70	5,95	10,35	-11,16	-0,88579	0,99769	1,46438	1,21012	0,95783	300
	2298	-1,31	-3,74	5,90	10,00	-11,27	-0,83177	0,92494	1,23493	1,11127	0,96404	250
	1831	-1,15	-3,71	5,95	9,91	-11,78	-0,82322	0,95919	1,37236	1,17148	0,96029	200
	1420	-1,09	-3,37	6,11	11,25	-13,02	-0,78527	1,05298	1,74988	1,32283	0,95021	150
	986	-0,97	-3,40	6,29	12,49	-15,01	-0,78309	1,12818	2,14131	1,46332	0,93998	100
	517	0,09	-0,08	7,21	24,53	-15,68	-1,49433	2,59379	21,63873	4,65175	0,39570	50
RFBBase	4449	-1,39	-3,93	5,93	9,57	-11,59	-0,82245	0,88761	1,12682	1,06152	0,96749	500
	4019	-1,26	-3,76	5,94	9,69	-10,06	-0,85647	0,90409	1,14283	1,06903	0,96716	450
	3573	-1,36	-3,67	5,94	11,31	-10,79	-0,84247	1,07060	1,73156	1,31589	0,94984	400
	3153	-1,29	-3,75	5,93	9,72	-10,70	-0,88083	0,93105	1,22748	1,10792	0,96457	350
	2724	-1,24	-3,70	5,95	10,41	-11,18	-0,88774	1,00020	1,46804	1,21163	0,95773	300
	2298	-1,30	-3,74	5,90	9,96	-11,05	-0,83392	0,92665	1,23926	1,11322	0,96391	250
	1831	-1,15	-3,70	5,95	9,85	-11,93	-0,82261	0,95871	1,37104	1,17092	0,96033	200
	1420	-1,09	-3,37	6,11	11,31	-13,18	-0,78474	1,05446	1,75273	1,32391	0,95013	150
	986	-0,97	-3,40	6,29	12,52	-15,56	-0,78428	1,13318	2,17703	1,47548	0,93898	100
	517	0,09	-0,06	7,22	24,72	-16,00	-1,49921	2,60418	21,75122	4,66382	0,39256	50

Tabela 98. Wyniki estymacji modeli na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji, na odcinkach toru wzorcowego o zmiennym kącie – pomiary kąta nieuśrednione, prędkość kątowa uśrednione

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
Pomiary	1774	-1,14	-2,10	5,49	8,94	-10,85	0,82295	0,87439	1,07415	1,03641	0,96275	500
	1606	-1,01	-1,90	5,49	8,93	-9,70	0,86019	0,90023	1,12395	1,06016	0,96111	450
	1455	-1,17	-2,11	5,47	9,45	-9,78	0,86041	0,97826	1,37237	1,17148	0,95220	400
	1286	-1,04	-2,02	5,52	9,21	-10,35	0,86583	0,92339	1,21773	1,10351	0,95843	350
	1121	-1,07	-1,82	5,49	9,00	-10,33	0,86845	0,97156	1,40648	1,18595	0,95150	300
	922	-1,29	-2,23	5,43	8,88	-10,03	0,82817	0,95589	1,35420	1,16370	0,95288	250
	748	-1,03	-2,05	5,54	9,41	-10,26	0,81122	0,99318	1,47037	1,21259	0,95001	200
	603	-1,23	-1,98	5,59	10,34	-10,49	0,79628	1,11534	1,95004	1,39644	0,93404	150
	428	-1,11	-2,00	5,74	10,09	-11,28	0,80909	1,26797	2,66407	1,63220	0,91283	100
	243	-0,57	-1,35	6,22	14,90	-13,67	1,49966	2,73537	19,63094	4,43068	0,37393	50
EstRegWielORT	1774	-1,17	-2,12	5,46	8,93	-11,49	0,79945	0,82774	0,91604	0,95710	0,96823	500
	1606	-1,03	-1,96	5,46	8,88	-9,81	0,83796	0,85388	0,91589	0,95702	0,96831	450
	1455	-1,21	-2,18	5,48	9,90	-10,68	0,82891	0,99290	1,42370	1,19319	0,95041	400
	1286	-1,07	-2,04	5,51	9,20	-10,71	0,83609	0,86418	0,98535	0,99265	0,96637	350
	1121	-1,10	-1,95	5,51	9,15	-11,14	0,84274	0,93604	1,26669	1,12547	0,95632	300
	922	-1,32	-2,29	5,47	9,22	-11,45	0,79528	0,87246	1,03061	1,01519	0,96414	250
	748	-1,05	-2,08	5,64	9,63	-11,47	0,79040	0,91309	1,22074	1,10487	0,95850	200
	603	-1,28	-2,09	5,80	11,22	-12,46	0,74772	1,06054	1,82699	1,35166	0,93820	150
	428	-1,14	-2,01	6,05	11,09	-14,13	0,77757	1,23877	2,55099	1,59718	0,91653	100
	243	-0,66	-1,10	6,99	18,47	-16,27	1,41037	2,80569	22,83606	4,77871	0,27172	50
EstRegWielORTUzup	1774	-1,17	-2,12	5,46	8,93	-11,49	0,79943	0,82772	0,91602	0,95709	0,96823	500
	1606	-1,03	-1,96	5,46	8,88	-9,81	0,83794	0,85386	0,91587	0,95701	0,96831	450
	1455	-1,21	-2,18	5,48	9,90	-10,68	0,82887	0,99289	1,42369	1,19319	0,95041	400
	1286	-1,07	-2,04	5,51	9,20	-10,71	0,83606	0,86415	0,98532	0,99263	0,96637	350
	1121	-1,10	-1,95	5,51	9,15	-11,14	0,84271	0,93600	1,26654	1,12541	0,95633	300
	922	-1,32	-2,29	5,47	9,22	-11,45	0,79524	0,87239	1,03043	1,01510	0,96415	250
	748	-1,05	-2,08	5,64	9,63	-11,46	0,79047	0,91295	1,22028	1,10466	0,95851	200
	603	-1,28	-2,09	5,80	11,22	-12,45	0,74779	1,06070	1,82876	1,35232	0,93814	150
	428	-1,14	-2,01	6,05	11,09	-14,23	0,77741	1,24004	2,55789	1,59934	0,91630	100
	243	-0,66	-1,10	6,99	18,47	-16,18	1,40946	2,80591	22,84813	4,77997	0,27133	50
KNNBase	1774	-1,13	-2,16	5,48	8,93	-11,80	-0,83478	0,87462	1,02508	1,01246	0,96445	500
	1606	-1,00	-1,94	5,47	9,10	-10,18	-0,86929	0,89806	1,02903	1,01441	0,96440	450
	1455	-1,20	-2,16	5,51	10,05	-11,01	-0,83395	1,05875	1,62288	1,27392	0,94347	400
	1286	-1,04	-2,05	5,52	10,27	-10,65	-0,86702	0,91216	1,10372	1,05058	0,96233	350
	1121	-1,09	-2,06	5,52	9,23	-10,89	-0,84778	0,97643	1,37780	1,17380	0,95249	300
	922	-1,31	-2,29	5,49	9,23	-11,36	-0,80719	0,91564	1,11923	1,05794	0,96106	250
	748	-1,03	-2,12	5,68	10,03	-12,75	-0,81274	0,96537	1,38018	1,17481	0,95307	200
	603	-1,29	-2,12	5,80	10,71	-13,76	-0,73659	1,10324	1,95183	1,39708	0,93398	150
	428	-1,10	-1,84	6,06	10,99	-14,57	-0,81334	1,30118	2,83495	1,68373	0,90723	100
	243	-0,61	-0,84	7,08	22,29	-18,04	-1,45622	2,90945	23,41753	4,83917	0,25317	50
MLP	1774	-1,27	-2,29	5,50	9,08	-11,57	-0,69571	0,73893	0,76563	0,87500	0,97345	500
	1606	-1,13	-2,06	5,50	9,05	-10,02	-0,73562	0,76351	0,76174	0,87278	0,97365	450
	1455	-1,30	-2,25	5,52	9,93	-10,70	-0,73625	0,95619	1,34708	1,16064	0,95308	400
	1286	-1,16	-2,13	5,54	9,35	-10,85	-0,74391	0,78378	0,84235	0,91780	0,97125	350
	1121	-1,19	-2,13	5,53	9,25	-11,03	-0,75422	0,87128	1,13039	1,06320	0,96102	300
	922	-1,40	-2,35	5,49	9,25	-11,31	-0,71698	0,80860	0,90343	0,95049	0,96857	250
	748	-1,11	-2,17	5,65	9,65	-11,21	-0,72629	0,86380	1,09557	1,04670	0,96275	200
	603	-1,34	-2,15	5,76	11,15	-12,05	-0,69053	1,00415	1,63282	1,27782	0,94477	150

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
	428	-1,16	-2,03	6,01	10,89	-13,66	-0,75494	1,20081	2,42588	1,55753	0,92062	100
	243	-0,66	-1,16	6,92	19,45	-16,13	-1,40379	2,76331	22,43164	4,73621	0,28462	50
MLP2	1774	-1,32	-2,39	5,42	8,73	-11,64	-0,65069	0,69817	0,69980	0,83654	0,97573	500
	1606	-1,18	-2,15	5,42	8,70	-9,94	-0,68377	0,71415	0,68484	0,82755	0,97631	450
	1455	-1,35	-2,24	5,46	9,63	-10,85	-0,68862	0,93639	1,29260	1,13693	0,95498	400
	1286	-1,21	-2,21	5,48	8,98	-10,84	-0,69257	0,73678	0,78305	0,88490	0,97327	350
	1121	-1,23	-2,18	5,49	8,92	-11,47	-0,70689	0,84329	1,10713	1,05220	0,96182	300
	922	-1,44	-2,47	5,45	8,99	-11,83	-0,67053	0,77543	0,86515	0,93014	0,96990	250
	748	-1,17	-2,20	5,63	9,38	-11,98	-0,67116	0,83778	1,08104	1,03973	0,96324	200
	603	-1,41	-2,14	5,81	11,12	-12,97	-0,62067	1,02948	1,76612	1,32896	0,94026	150
	428	-1,25	-2,02	6,07	11,04	-14,97	-0,67101	1,21597	2,54848	1,59640	0,91661	100
	243	-0,74	-1,02	7,03	19,01	-16,27	-1,32679	2,77138	22,57692	4,75152	0,27998	50
RF	1774	-1,15	-2,15	5,48	9,29	-11,56	-0,81572	0,85433	0,95465	0,97706	0,96689	500
	1606	-1,02	-1,98	5,46	9,28	-10,01	-0,84702	0,87044	0,93465	0,96678	0,96766	450
	1455	-1,22	-2,09	5,51	9,96	-10,74	-0,81261	1,02654	1,50585	1,22713	0,94755	400
	1286	-1,06	-2,02	5,51	9,55	-10,72	-0,84562	0,88602	1,01600	1,00797	0,96532	350
	1121	-1,09	-2,01	5,51	9,32	-11,16	-0,84999	0,96212	1,32482	1,15101	0,95432	300
	922	-1,32	-2,27	5,48	9,25	-11,27	-0,79833	0,89559	1,05482	1,02704	0,96330	250
	748	-1,04	-2,11	5,66	9,75	-11,78	-0,79979	0,93124	1,24892	1,11755	0,95754	200
	603	-1,29	-2,09	5,80	11,25	-13,02	-0,73653	1,07319	1,82648	1,35147	0,93822	150
	428	-1,12	-1,97	6,03	10,73	-15,01	-0,79778	1,25942	2,66022	1,63102	0,91295	100
	243	-0,65	-0,87	7,00	20,33	-15,68	-1,41440	2,83910	23,00249	4,79609	0,26641	50
RFBBase	1774	-1,15	-2,16	5,48	9,32	-11,59	-0,81241	0,85208	0,95243	0,97592	0,96697	500
	1606	-1,02	-2,01	5,46	9,32	-10,04	-0,84471	0,86880	0,93257	0,96570	0,96774	450
	1455	-1,22	-2,07	5,50	9,95	-10,79	-0,80989	1,02546	1,50593	1,22716	0,94755	400
	1286	-1,06	-2,02	5,51	9,55	-10,70	-0,84516	0,88589	1,01988	1,00989	0,96519	350
	1121	-1,09	-2,04	5,51	9,35	-11,08	-0,84949	0,96159	1,32543	1,15127	0,95429	300
	922	-1,32	-2,29	5,48	9,29	-11,05	-0,79772	0,89365	1,05263	1,02598	0,96337	250
	748	-1,04	-2,10	5,66	9,70	-11,93	-0,79646	0,92875	1,24601	1,11625	0,95764	200
	603	-1,29	-2,07	5,80	11,31	-13,18	-0,73404	1,07507	1,83332	1,35400	0,93799	150
	428	-1,12	-1,98	6,04	10,90	-15,56	-0,79626	1,26682	2,72481	1,65070	0,91084	100
	243	-0,65	-0,87	7,01	20,21	-16,00	-1,41419	2,85098	23,06869	4,80299	0,26430	50

Tabela 99. Wyniki estymacji modeli na stanowisku pomiarowym długości i kątów rotacji, na odcinkach toru wzorcowego o stałym kącie – pomiary kąta nieuśrednione, prędkość kątowa uśrednione

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
Pomiary	2675	-1,52	-4,46	6,18	9,23	-9,74	0,86290	0,86908	0,94279	0,97098	0,97549	500
	2413	-1,39	-4,43	6,20	9,37	-9,61	0,88838	0,89304	0,97389	0,98686	0,97481	450
	2118	-1,42	-4,33	6,19	10,38	-9,77	0,89880	0,95421	1,26353	1,12407	0,96716	400
	1867	-1,42	-4,38	6,16	9,43	-9,85	0,92982	0,93354	1,06620	1,03257	0,97213	350
	1603	-1,35	-4,34	6,20	9,91	-10,06	0,90982	0,92447	1,12412	1,06025	0,97095	300
	1376	-1,28	-4,37	6,12	9,67	-9,72	0,87066	0,88048	0,97993	0,98991	0,97428	250
	1083	-1,20	-4,34	6,11	9,47	-9,94	0,85818	0,88066	1,00841	1,00420	0,97353	200
	817	-0,92	-4,08	6,26	10,01	-10,47	0,83087	0,88930	1,16848	1,08096	0,97022	150
	558	-0,81	-4,20	6,26	11,97	-10,47	0,81498	0,86920	1,04446	1,02199	0,97360	100
	274	0,69	0,26	6,50	17,52	-10,88	1,50800	1,76717	14,89438	3,85932	0,61832	50
EstRegWielORT	2675	-1,53	-4,42	6,13	9,38	-9,96	0,84500	0,86641	0,98032	0,99011	0,97451	500
	2413	-1,41	-4,40	6,16	9,51	-9,81	0,86965	0,88763	1,00190	1,00095	0,97409	450
	2118	-1,44	-4,21	6,18	11,29	-10,12	0,87631	1,05423	1,65175	1,28520	0,95707	400
	1867	-1,43	-4,30	6,13	9,66	-10,03	0,91446	0,92937	1,11248	1,05474	0,97092	350
	1603	-1,37	-4,22	6,19	10,34	-11,34	0,88926	0,94993	1,25863	1,12189	0,96747	300
	1376	-1,31	-4,29	6,11	9,76	-10,43	0,85009	0,88777	1,07925	1,03887	0,97167	250
	1083	-1,22	-4,19	6,12	9,95	-11,08	0,83333	0,91390	1,18777	1,08985	0,96882	200
	817	-0,94	-3,84	6,30	10,44	-11,15	0,81218	0,98351	1,48329	1,21790	0,96220	150
	558	-0,84	-4,06	6,43	12,41	-13,63	0,78476	1,00037	1,59394	1,26252	0,95971	100
	274	0,72	0,42	7,19	22,88	-15,03	1,53559	2,32040	19,13938	4,37486	0,50954	50
EstRegWielORTUzup	2675	-1,53	-4,42	6,13	9,38	-9,96	0,84497	0,86637	0,98026	0,99008	0,97451	500
	2413	-1,41	-4,40	6,16	9,51	-9,81	0,86961	0,88759	1,00184	1,00092	0,97409	450
	2118	-1,44	-4,21	6,18	11,29	-10,12	0,87628	1,05421	1,65174	1,28520	0,95707	400
	1867	-1,43	-4,30	6,13	9,66	-10,03	0,91443	0,92934	1,11243	1,05472	0,97092	350
	1603	-1,37	-4,22	6,19	10,34	-11,34	0,88923	0,94990	1,25859	1,12187	0,96747	300
	1376	-1,31	-4,29	6,11	9,76	-10,43	0,85006	0,88775	1,07922	1,03885	0,97167	250
	1083	-1,22	-4,19	6,12	9,95	-11,07	0,83331	0,91387	1,18769	1,08981	0,96882	200
	817	-0,94	-3,84	6,30	10,44	-11,15	0,81215	0,98349	1,48320	1,21787	0,96220	150
	558	-0,84	-4,06	6,43	12,41	-13,69	0,78451	1,00061	1,59591	1,26329	0,95966	100
	274	0,72	0,42	7,20	22,89	-15,06	1,53421	2,32336	19,16951	4,37830	0,50877	50
KNNBase	2675	-1,54	-4,31	6,12	9,86	-10,18	-0,83588	0,93451	1,31696	1,14759	0,96576	500
	2413	-1,40	-4,07	6,12	10,03	-10,18	-0,87349	0,95991	1,37404	1,17219	0,96446	450
	2118	-1,42	-3,96	6,17	11,33	-10,18	-0,89901	1,14080	2,00888	1,41735	0,94779	400
	1867	-1,43	-3,96	6,11	10,03	-10,54	-0,92110	0,99312	1,48309	1,21782	0,96123	350
	1603	-1,35	-3,96	6,16	10,43	-11,59	-0,90631	1,03647	1,63048	1,27690	0,95786	300
	1376	-1,26	-3,88	6,09	10,22	-10,43	-0,89129	0,98933	1,48775	1,21974	0,96095	250
	1083	-1,18	-3,83	6,09	10,27	-11,48	-0,87269	1,01502	1,58207	1,25780	0,95847	200
	817	-0,92	-3,64	6,30	10,43	-11,08	-0,83071	1,06731	1,80912	1,34504	0,95390	150
	558	-0,86	-3,70	6,44	12,26	-14,25	-0,76918	1,05159	1,84432	1,35806	0,95338	100
	274	0,70	0,17	7,31	23,91	-15,47	-1,51902	2,37868	19,93473	4,46483	0,48916	50
MLP	2675	-1,67	-4,55	6,18	9,46	-10,09	-0,71016	0,77503	0,85615	0,92529	0,97774	500
	2413	-1,54	-4,50	6,20	9,59	-9,95	-0,73639	0,78687	0,87510	0,93547	0,97737	450
	2118	-1,54	-4,24	6,23	11,16	-10,27	-0,77529	1,00437	1,59370	1,26242	0,95858	400
	1867	-1,56	-4,39	6,18	9,73	-10,23	-0,78759	0,83646	0,98117	0,99054	0,97435	350
	1603	-1,47	-4,27	6,23	10,37	-11,35	-0,78363	0,89655	1,17964	1,08611	0,96951	300
	1376	-1,42	-4,34	6,16	9,87	-10,41	-0,74002	0,82348	0,99592	0,99796	0,97386	250
	1083	-1,33	-4,22	6,15	9,97	-10,97	-0,72908	0,86325	1,11737	1,05706	0,97067	200
	817	-1,03	-3,85	6,33	10,47	-11,22	-0,72754	0,95975	1,43801	1,19917	0,96335	150

Model	Samples	mean_val [°]	median_val [°]	std_val [°]	max_val [°]	min_val [°]	ME [°]	MAE [°]	MSE	RMSE	R2	Id
	558	-0,91	-4,13	6,44	12,43	-12,99	-0,71053	0,95366	1,46416	1,21002	0,96299	100
	274	0,76	0,61	7,18	23,38	-14,75	-1,57627	2,33117	19,37289	4,40146	0,50355	50
MLP2	2675	-1,70	-4,55	6,07	9,10	-10,11	-0,67662	0,75550	0,81050	0,90028	0,97893	500
	2413	-1,57	-4,51	6,09	9,22	-9,93	-0,70626	0,77137	0,83502	0,91379	0,97840	450
	2118	-1,58	-4,26	6,14	11,25	-10,24	-0,73688	0,98596	1,50230	1,22568	0,96096	400
	1867	-1,60	-4,40	6,07	9,40	-10,16	-0,75186	0,81002	0,92167	0,96004	0,97590	350
	1603	-1,52	-4,28	6,13	10,04	-11,63	-0,73646	0,86023	1,09774	1,04773	0,97163	300
	1376	-1,45	-4,32	6,06	9,46	-10,62	-0,70100	0,80494	0,94677	0,97302	0,97515	250
	1083	-1,37	-4,24	6,06	9,69	-11,39	-0,68758	0,84489	1,06955	1,03419	0,97192	200
	817	-1,08	-3,96	6,25	10,14	-11,30	-0,67147	0,92524	1,34957	1,16171	0,96561	150
	558	-0,98	-4,17	6,41	12,31	-14,36	-0,64606	0,95384	1,54248	1,24196	0,96101	100
	274	0,65	0,89	7,23	23,06	-15,72	-1,47261	2,36172	19,50286	4,41620	0,50022	50
RF	2675	-1,55	-4,12	6,21	9,57	-10,13	-0,82524	0,90694	1,23555	1,11155	0,96787	500
	2413	-1,42	-4,07	6,23	9,70	-9,98	-0,85931	0,92437	1,27472	1,12903	0,96703	450
	2118	-1,45	-3,97	6,21	11,27	-10,14	-0,86427	1,09803	1,87861	1,37062	0,95118	400
	1867	-1,45	-4,01	6,20	9,76	-10,29	-0,89913	0,95730	1,36105	1,16664	0,96442	350
	1603	-1,35	-3,97	6,23	10,35	-11,11	-0,91082	1,02257	1,56199	1,24979	0,95963	300
	1376	-1,30	-3,97	6,17	10,00	-10,38	-0,85418	0,94460	1,35561	1,16431	0,96442	250
	1083	-1,22	-3,97	6,14	9,91	-11,10	-0,83941	0,97849	1,45761	1,20731	0,96174	200
	817	-0,93	-3,69	6,32	10,35	-11,15	-0,82124	1,03806	1,69334	1,30128	0,95685	150
	558	-0,85	-3,81	6,48	12,49	-13,20	-0,77183	1,02751	1,74329	1,32034	0,95594	100
	274	0,75	0,04	7,32	24,53	-15,20	-1,56521	2,37623	20,42926	4,51987	0,47648	50
RFBBase	2675	-1,55	-4,11	6,21	9,57	-10,10	-0,82911	0,91117	1,24247	1,11466	0,96769	500
	2413	-1,41	-4,06	6,23	9,69	-10,06	-0,86430	0,92758	1,28276	1,13259	0,96682	450
	2118	-1,45	-3,95	6,21	11,31	-10,13	-0,86484	1,10161	1,88655	1,37352	0,95097	400
	1867	-1,44	-3,99	6,20	9,72	-10,30	-0,90541	0,96215	1,37047	1,17067	0,96417	350
	1603	-1,34	-3,95	6,24	10,41	-11,18	-0,91448	1,02721	1,56777	1,25211	0,95948	300
	1376	-1,30	-3,96	6,17	9,96	-10,40	-0,85818	0,94877	1,36431	1,16804	0,96419	250
	1083	-1,22	-3,95	6,15	9,85	-11,08	-0,84067	0,97941	1,45740	1,20723	0,96174	200
	817	-0,93	-3,70	6,33	10,39	-11,17	-0,82216	1,03925	1,69325	1,30125	0,95685	150
	558	-0,85	-3,81	6,48	12,52	-13,49	-0,77509	1,03067	1,75686	1,32547	0,95559	100
	274	0,76	0,06	7,33	24,72	-15,11	-1,57462	2,38530	20,58281	4,53683	0,47255	50

Tabela 100. Średnie prędkości liniowe ortometru podczas badań w ośrodku rehabilitacji

Pacjent	Faza	V_{sr} prędkości chwilowych [mm/s]	Czas C7-S1 [s]	Długość C7-S1 [mm]	Prędkość liniowa C7-S1 [mm]
1	FazaStojaca	14,59	23,62	352,00	14,91
	FazaAdamsa1	13,73	28,25	372,00	13,17
	FazaAdamsa2	14,89	26,88	392,00	14,58
2	FazaStojaca	19,91	11,52	228,00	19,80
3	FazaStojaca	21,04	22,04	438,00	19,87
	FazaAdamsa1	40,83	12,12	490,00	40,42
	FazaAdamsa2	28,35	18,54	538,00	29,02
4	FazaStojaca	29,51	10,75	312,00	29,03
	FazaAdamsa1	26,88	14,75	388,00	26,31
	FazaAdamsa2	28,88	13,92	400,00	28,74
10	FazaStojaca	26,23	15,88	408,00	25,69
	FazaAdamsa1	29,95	19,34	562,00	29,05
	FazaAdamsa2	35,26	15,90	550,00	34,59
11	FazaStojaca	34,36	7,87	268,00	34,06
	FazaAdamsa1	33,36	12,07	404,00	33,46
13	FazaStojaca	42,61	9,48	416,00	43,90
	FazaAdamsa1	21,88	22,18	474,00	21,37
	FazaAdamsa2	29,81	16,17	488,00	30,18
14	FazaStojaca	19,92	13,68	290,00	21,20
	FazaAdamsa1	28,42	12,46	368,00	29,53
	FazaAdamsa2	32,98	10,92	344,00	31,51
15	FazaStojaca	52,05	8,10	412,00	50,86
	FazaAdamsa1	58,84	8,72	506,00	58,01
	FazaAdamsa2	41,44	12,13	500,00	41,23
16	FazaStojaca	20,30	25,94	516,00	19,89
	FazaAdamsa1	17,10	35,06	582,00	16,60
	FazaAdamsa2	16,08	35,46	572,00	16,13
17	FazaStojaca	18,22	18,90	340,00	17,99
	FazaAdamsa1	19,56	21,57	404,00	18,73
	FazaAdamsa2	22,76	16,30	370,00	22,70
18	FazaStojaca	27,06	13,57	356,00	26,24
	FazaAdamsa1	21,39	18,93	404,00	21,35
	FazaAdamsa2	20,59	19,95	402,00	20,16
20	FazaStojaca	28,05	16,56	464,00	28,01
	FazaAdamsa1	25,19	21,94	544,00	24,79
	FazaAdamsa2	16,62	32,22	534,00	16,57
21	FazaStojaca	28,98	11,89	342,00	28,76
	FazaAdamsa1	21,67	18,21	394,00	21,63
	FazaAdamsa2	18,91	21,23	390,00	18,37
22	FazaStojaca	19,24	21,74	410,00	18,86
	FazaAdamsa1	29,51	16,74	488,00	29,15
	FazaAdamsa2	23,02	22,22	512,00	23,04
25	FazaStojaca	14,04	29,09	396,00	13,61
	FazaAdamsa1	22,00	19,38	418,00	21,57
	FazaAdamsa2	16,45	24,43	404,00	16,54
27	FazaStojaca	17,72	18,17	326,00	17,95
	FazaAdamsa1	20,27	19,80	376,00	18,99
	FazaAdamsa2	25,64	14,33	366,00	25,54
28	FazaStojaca	44,80	10,72	468,00	43,68
	FazaAdamsa1	19,79	29,68	566,00	19,07
	FazaAdamsa2	33,89	17,42	564,00	32,38
29	FazaStojaca	30,45	15,70	478,00	30,45
	FazaAdamsa1	36,03	16,20	570,00	35,19
	FazaAdamsa2	30,67	18,95	562,00	29,65
30	FazaStojaca	39,24	11,00	382,00	34,73
	FazaAdamsa2	42,16	11,09	452,00	40,74
34	FazaAdamsa1	10,61	27,20	300,00	11,03
	FazaAdamsa2	26,42	13,94	354,00	25,40

Pacjent	Faza	V_{sr} prędkości chwilowych [mm/s]	Czas C7-S1 [s]	Długość C7-S1 [mm]	Prędkość liniowa C7-S1 [mm]
35	FazaStojaca	33,09	14,66	486,00	33,15
	FazaAdamsa1	43,10	13,16	556,00	42,24
	FazaAdamsa2	31,00	16,97	542,00	31,93
36	FazaStojaca	32,88	11,05	368,00	33,30
	FazaAdamsa1	31,64	13,89	428,00	30,80
	FazaAdamsa2	20,10	21,15	416,00	19,67
37	FazaStojaca	20,22	14,65	294,00	20,06
	FazaAdamsa1	28,98	10,72	314,00	29,29
	FazaAdamsa2	23,52	14,52	320,00	22,03
38	FazaStojaca	31,47	15,94	504,00	31,61
	FazaAdamsa1	29,58	20,44	588,00	28,77
	FazaAdamsa2	35,88	16,76	592,00	35,32
40	FazaStojaca	33,48	13,67	442,00	32,33
	FazaAdamsa1	35,28	13,64	468,00	34,30
	FazaAdamsa2	25,76	19,73	504,00	25,55
43	FazaStojaca	21,03	18,23	402,00	22,06
	FazaAdamsa1	34,44	13,34	442,00	33,14
	FazaAdamsa2	15,67	28,69	444,00	15,48
44	FazaStojaca	28,09	18,99	520,00	27,38
	FazaAdamsa1	42,29	14,72	608,00	41,32
	FazaAdamsa2	23,39	25,63	592,00	23,10
45	FazaStojaca	55,75	5,18	278,00	53,66
46	FazaStojaca	22,66	19,38	436,00	22,50
50	FazaAdamsa1	25,76	31,20	41,79	30,13
	FazaAdamsa2	26,59	18,51	496,00	26,79
51	FazaStojaca	31,67	10,79	336,00	31,13
	FazaAdamsa1	13,23	13,53	176,00	13,01
52	FazaStojaca	22,26	11,51	240,00	20,85
	FazaAdamsa1	22,02	13,13	280,00	21,33
	FazaAdamsa2	16,92	15,97	264,00	16,54
53	FazaStojaca	28,27	11,09	316,00	28,50
	FazaAdamsa2	20,84	17,88	352,00	19,68
Średnia		27,30	17,33	426,71	26,88
Std		9,45	6,08	97,64	9,23
Max		58,84	35,46	608,00	58,01
Min		10,61	5,18	176,00	11,03

Tabela 101. Średnie prędkości kątowe ortometru podczas badań w ośrodku rehabilitacji

Pacjent	Faza	$ \omega _{sr}$ [°/s]	Odchylenie std $ \omega _{sr}$ [°/s]	Min $ \omega $ [°/s]	Max $ \omega $ [°/s]
1	FazaAdamsa1	1,26	1,06	0,03	5,31
	FazaAdamsa2	0,95	0,77	0,00	3,25
3	FazaAdamsa1	1,34	0,96	0,08	5,15
	FazaAdamsa2	1,10	0,90	0,01	3,96
4	FazaAdamsa1	1,42	1,34	0,05	7,80
	FazaAdamsa2	1,95	0,94	0,26	8,86
10	FazaAdamsa1	1,54	1,89	0,00	7,08
	FazaAdamsa2	1,03	0,96	0,01	3,97
11	FazaAdamsa1	1,80	22,18	0,02	8,01
13	FazaAdamsa1	1,45	1,41	0,00	7,71
	FazaAdamsa2	1,68	1,77	0,03	8,61
14	FazaAdamsa1	2,12	1,91	0,01	6,49
	FazaAdamsa2	1,75	1,47	0,01	7,05
15	FazaAdamsa1	1,63	1,09	0,06	4,80
	FazaAdamsa2	1,32	1,05	0,03	4,79
16	FazaAdamsa1	0,94	0,90	0,01	5,72
	FazaAdamsa2	0,77	0,72	0,00	4,10
17	FazaAdamsa1	1,88	1,48	0,03	5,99
	FazaAdamsa2	1,62	1,49	0,02	6,20
18	FazaAdamsa1	1,22	1,28	0,01	6,34
	FazaAdamsa2	1,23	1,00	0,04	4,74
20	FazaAdamsa1	1,01	0,94	0,01	4,96
	FazaAdamsa2	0,92	0,78	0,02	4,16
21	FazaAdamsa1	1,21	0,90	0,02	3,96
	FazaAdamsa2	0,93	0,78	0,00	3,30
22	FazaAdamsa1	2,46	2,09	0,00	9,71
	FazaAdamsa2	2,47	1,94	0,04	8,17
25	FazaAdamsa1	1,34	1,40	0,00	7,58
	FazaAdamsa2	1,22	1,24	0,01	6,29
27	FazaAdamsa1	1,07	0,93	0,00	4,35
	FazaAdamsa2	1,80	1,53	0,02	7,48
28	FazaAdamsa1	2,59	4,76	0,01	35,04
	FazaAdamsa2	1,22	1,02	0,02	5,10
29	FazaAdamsa1	1,15	0,87	0,10	3,46
	FazaAdamsa2	1,23	1,48	0,01	8,86
30	FazaAdamsa2	1,10	1,07	0,01	4,17
34	FazaAdamsa1	2,91	2,81	0,00	13,26
	FazaAdamsa2	1,58	1,49	0,04	5,25
35	FazaAdamsa1	1,41	1,50	0,00	5,75
	FazaAdamsa2	0,97	0,87	0,01	3,70
36	FazaAdamsa1	1,37	0,96	0,07	3,82
	FazaAdamsa2	0,87	0,78	0,01	4,42
37	FazaAdamsa1	2,01	1,70	0,16	7,13
	FazaAdamsa2	2,87	2,78	0,25	14,24
38	FazaAdamsa1	5,94	5,39	0,01	23,40
	FazaAdamsa2	3,92	2,86	0,03	11,02
40	FazaAdamsa1	3,64	3,25	0,11	15,07
	FazaAdamsa2	3,01	3,20	0,08	18,69
43	FazaAdamsa1	4,35	4,08	0,10	16,55
	FazaAdamsa2	2,90	2,71	0,04	12,84
44	FazaAdamsa1	4,39	3,79	0,03	19,11
	FazaAdamsa2	3,22	2,90	0,08	14,83
50	FazaAdamsa1	5,87	6,51	0,03	32,70
	FazaAdamsa2	3,88	3,78	0,07	20,48
51	FazaAdamsa1	1,37	1,29	0,02	5,45
52	FazaAdamsa1	0,99	0,87	0,00	4,57
	FazaAdamsa2	1,66	1,79	0,01	10,89
53	FazaAdamsa2	1,10	1,00	0,00	5,22
$ \omega _{sr}$ [°/s]		1,93	2,15	0,04	8,81
Std $ \omega _{sr}$ [°/s]		1,19	2,95	0,05	6,70
Min $ \omega _{sr}$ [°/s]		0,77	0,72	0,00	3,25
Max $ \omega _{sr}$ [°/s]		5,94	22,18	0,26	35,04

Tabela 102. Pomiary długości kręgosłupa wraz z położeniami punktów charakterystycznych wzorcowych i estymowanych

Pacjent	Faza	Pomiar	Długość C7-S1 [mm]	Droga przebyta [mm]	% drogi przebytej w fazie	Droga estymowana [mm]	AE drogi est [mm]	Błąd względny [%]
1	FazaStojaca	C7	352	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		136	37,16%	141,10	5,10	3,75%
		T12		208	56,83%	215,33	7,33	3,52%
		L3		286	78,14%	287,40	1,40	0,49%
		S1		352	96,17%	352,00	0,00	0,00%
1	FazaAdamsa1	C7	372	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		118	31,72%	130,86	12,86	10,90%
		T12		200	53,76%	212,03	12,03	6,01%
		L3		278	74,73%	291,23	13,23	4,76%
		S1		372	100,00%	372,00	0,00	0,00%
1	FazaAdamsa2	C7	392	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		124	31,63%	137,90	13,90	11,21%
		T12		214	54,59%	223,42	9,42	4,40%
		L3		300	76,53%	306,89	6,89	2,30%
		S1		392	100,00%	392,00	0,00	0,00%
2	FazaStojaca	C7	228	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		98	42,98%	91,39	6,61	6,74%
		T12		148	64,91%	139,48	8,52	5,76%
		L3		188	82,46%	186,16	1,84	0,98%
		S1		228	100,00%	228,00	0,00	0,00%
3	FazaStojaca	C7	438	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		200	45,66%	175,57	24,43	12,22%
		T12		272	62,10%	267,94	4,06	1,49%
		L3		346	79,00%	357,62	11,62	3,36%
		S1		438	100,00%	438,00	0,00	0,00%
3	FazaAdamsa1	C7	490	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		160	32,65%	172,38	12,38	7,73%
		T12		276	56,33%	279,28	3,28	1,19%
		L3		376	76,73%	383,61	7,61	2,02%
		S1		490	100,00%	490,00	0,00	0,00%
3	FazaAdamsa2	C7	538	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		190	35,32%	189,26	0,74	0,39%
		T12		312	57,99%	306,64	5,36	1,72%
		L3		428	79,55%	421,19	6,81	1,59%
		S1		538	100,00%	538,00	0,00	0,00%
4	FazaStojaca	C7	312	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		140	44,87%	125,06	14,94	10,67%
		T12		202	64,74%	190,86	11,14	5,51%
		L3		256	82,05%	254,74	1,26	0,49%
		S1		312	100,00%	312,00	0,00	0,00%
4	FazaAdamsa1	C7	388	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		122	31,44%	136,49	14,49	11,88%
		T12		230	59,28%	221,14	8,86	3,85%
		L3		288	74,23%	303,76	15,76	5,47%
		S1		388	100,00%	388,00	0,00	0,00%
4	FazaAdamsa2	C7	400	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		124	31,00%	140,71	16,71	13,48%
		T12		204	51,00%	227,98	23,98	11,76%
		L3		316	79,00%	313,15	2,85	0,90%
		S1		400	100,00%	400,00	0,00	0,00%
10	FazaStojaca	C7	408	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		196	48,04%	163,54	32,46	16,56%
		T12		250	61,27%	249,59	0,41	0,16%
		L3		360	88,24%	333,12	26,88	7,47%
		S1		408	100,00%	408,00	0,00	0,00%
10	FazaAdamsa1	C7	562	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		174	30,96%	197,70	23,70	13,62%
		T12		336	59,79%	320,32	15,68	4,67%

Pacjent	Faza	Pomiar	Długość C7-S1 [mm]	Droga przebyta [mm]	% drogi przebytej w fazie	Droga estymowana [mm]	AE drogi est [mm]	Błąd względny [%]
		L3		454	80,78%	439,98	14,02	3,09%
		S1		562	100,00%	562,00	0,00	0,00%
10	FazaAdamsa2	C7	550	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		180	32,73%	193,48	13,48	7,49%
		T12		292	53,09%	313,48	21,48	7,36%
		L3		446	81,09%	430,58	15,42	3,46%
		S1		550	100,00%	550,00	0,00	0,00%
11	FazaStojaca	C7	268	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		136	49,28%	107,43	28,57	21,01%
		T12		184	66,67%	163,94	20,06	10,90%
		L3		220	79,71%	218,82	1,18	0,54%
		S1		268	97,10%	268,00	0,00	0,00%
11	FazaAdamsa1	C7	404	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		166	41,09%	142,12	23,88	14,38%
		T12		268	66,34%	230,26	37,74	14,08%
		L3		330	81,68%	316,28	13,72	4,16%
		S1		404	100,00%	404,00	0,00	0,00%
13	FazaStojaca	C7	416	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		186	42,86%	166,75	19,25	10,35%
		T12		262	60,37%	254,48	7,52	2,87%
		L3		348	80,18%	339,65	8,35	2,40%
		S1		416	95,85%	416,00	0,00	0,00%
13	FazaAdamsa1	C7	474	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		150	31,65%	166,75	16,75	11,16%
		T12		260	54,85%	270,16	10,16	3,91%
		L3		356	75,11%	371,08	15,08	4,24%
		S1		474	100,00%	474,00	0,00	0,00%
13	FazaAdamsa2	C7	488	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		152	31,15%	171,67	19,67	12,94%
		T12		308	63,11%	278,14	29,86	9,69%
		L3		398	81,56%	382,04	15,96	4,01%
		S1		488	100,00%	488,00	0,00	0,00%
14	FazaStojaca	C7	290	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		104	35,62%	116,24	12,24	11,77%
		T12		188	64,38%	177,40	10,60	5,64%
		L3		252	86,30%	236,78	15,22	6,04%
		S1		290	99,32%	290,00	0,00	0,00%
14	FazaAdamsa1	C7	368	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		128	34,78%	129,46	1,46	1,14%
		T12		248	67,39%	209,75	38,25	15,43%
		L3		308	83,70%	288,10	19,90	6,46%
		S1		368	100,00%	368,00	0,00	0,00%
14	FazaAdamsa2	C7	344	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		128	37,21%	121,01	6,99	5,46%
		T12		230	66,86%	196,07	33,93	14,75%
		L3		290	84,30%	269,31	20,69	7,13%
		S1		344	100,00%	344,00	0,00	0,00%
15	FazaStojaca	C7	412	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		170	41,26%	165,15	4,85	2,85%
		T12		248	60,19%	252,03	4,03	1,63%
		L3		342	83,01%	336,39	5,61	1,64%
		S1		412	100,00%	412,00	0,00	0,00%
15	FazaAdamsa1	C7	506	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		160	31,62%	178,00	18,00	11,25%
		T12		298	58,89%	288,40	9,60	3,22%
		L3		396	78,26%	396,14	0,14	0,03%
		S1		506	100,00%	506,00	0,00	0,00%
15	FazaAdamsa2	C7	500	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		154	30,80%	175,89	21,89	14,22%
		T12		276	55,20%	284,98	8,98	3,25%

Pacjent	Faza	Pomiar	Długość C7-S1 [mm]	Droga przebyta [mm]	% drogi przebytej w fazie	Droga estymowana [mm]	AE drogi est [mm]	Błąd względny [%]
		L3		356	71,20%	391,44	35,44	9,95%
		S1		500	100,00%	500,00	0,00	0,00%
16	FazaStojaca	C7	516	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		182	35,27%	206,84	24,84	13,65%
		T12		286	55,43%	315,66	29,66	10,37%
		L3		378	73,26%	421,30	43,30	11,46%
		S1		516	100,00%	516,00	0,00	0,00%
16	FazaAdamsa1	C7	582	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		218	37,46%	204,74	13,26	6,08%
		T12		320	54,98%	331,72	11,72	3,66%
		L3		442	75,95%	455,63	13,63	3,08%
		S1		582	100,00%	582,00	0,00	0,00%
16	FazaAdamsa2	C7	572	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		188	32,87%	201,22	13,22	7,03%
		T12		284	49,65%	326,02	42,02	14,79%
		L3		416	72,73%	447,81	31,81	7,65%
		S1		572	100,00%	572,00	0,00	0,00%
17	FazaStojaca	C7	340	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		138	40,59%	136,29	1,71	1,24%
		T12		208	61,18%	207,99	0,01	0,00%
		L3		296	87,06%	277,60	18,40	6,22%
		S1		340	100,00%	340,00	0,00	0,00%
17	FazaAdamsa1	C7	404	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		122	30,20%	142,12	20,12	16,49%
		T12		228	56,44%	230,26	2,26	0,99%
		L3		328	81,19%	316,28	11,72	3,57%
		S1		404	100,00%	404,00	0,00	0,00%
17	FazaAdamsa2	C7	370	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		126	34,05%	130,16	4,16	3,30%
		T12		192	51,89%	210,89	18,89	9,84%
		L3		280	75,68%	289,66	9,66	3,45%
		S1		370	100,00%	370,00	0,00	0,00%
18	FazaStojaca	C7	356	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		148	41,57%	142,70	5,30	3,58%
		T12		220	61,80%	217,78	2,22	1,01%
		L3		306	85,96%	290,67	15,33	5,01%
		S1		356	100,00%	356,00	0,00	0,00%
18	FazaAdamsa1	C7	404	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		156	38,61%	142,12	13,88	8,90%
		T12		230	56,93%	230,26	0,26	0,11%
		L3		334	82,67%	316,28	17,72	5,30%
		S1		404	100,00%	404,00	0,00	0,00%
18	FazaAdamsa2	C7	402	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		156	38,81%	141,42	14,58	9,35%
		T12		232	57,71%	229,12	2,88	1,24%
		L3		328	81,59%	314,72	13,28	4,05%
		S1		402	100,00%	402,00	0,00	0,00%
20	FazaStojaca	C7	464	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		146	31,47%	185,99	39,99	27,39%
		T12		264	56,90%	283,84	19,84	7,52%
		L3		352	75,86%	378,85	26,85	7,63%
		S1		464	100,00%	464,00	0,00	0,00%
20	FazaAdamsa1	C7	544	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		154	28,31%	191,37	37,37	24,27%
		T12		288	52,94%	310,06	22,06	7,66%
		L3		392	72,06%	425,89	33,89	8,64%
		S1		544	100,00%	544,00	0,00	0,00%
20	FazaAdamsa2	C7	534	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		154	28,84%	187,85	33,85	21,98%
		T12		286	53,56%	304,36	18,36	6,42%

Pacjent	Faza	Pomiar	Długość C7-S1 [mm]	Droga przebyta [mm]	% drogi przebytej w fazie	Droga estymowana [mm]	AE drogi est [mm]	Błąd względny [%]
		L3		388	72,66%	418,06	30,06	7,75%
		S1		534	100,00%	534,00	0,00	0,00%
21	FazaStojaca	C7	342	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		146	42,69%	137,09	8,91	6,10%
		T12		218	63,74%	209,21	8,79	4,03%
		L3		284	83,04%	279,24	4,76	1,68%
		S1		342	100,00%	342,00	0,00	0,00%
21	FazaAdamsa1	C7	394	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		160	40,61%	138,60	21,40	13,37%
		T12		224	56,85%	224,56	0,56	0,25%
		L3		310	78,68%	308,45	1,55	0,50%
		S1		394	100,00%	394,00	0,00	0,00%
21	FazaAdamsa2	C7	390	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		156	40,00%	137,20	18,80	12,05%
		T12		222	56,92%	222,28	0,28	0,13%
		L3		304	77,95%	305,32	1,32	0,43%
		S1		390	100,00%	390,00	0,00	0,00%
22	FazaStojaca	C7	410	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		154	37,56%	164,35	10,35	6,72%
		T12		218	53,17%	250,81	32,81	15,05%
		L3		310	75,61%	334,76	24,76	7,99%
		S1		410	100,00%	410,00	0,00	0,00%
22	FazaAdamsa1	C7	488	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		182	37,30%	171,67	10,33	5,67%
		T12		264	54,10%	278,14	14,14	5,36%
		L3		368	75,41%	382,04	14,04	3,82%
		S1		488	100,00%	488,00	0,00	0,00%
22	FazaAdamsa2	C7	512	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		178	34,77%	180,12	2,12	1,19%
		T12		288	56,25%	291,82	3,82	1,33%
		L3		384	75,00%	400,83	16,83	4,38%
		S1		512	100,00%	512,00	0,00	0,00%
25	FazaStojaca	C7	396	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		102	25,76%	158,73	56,73	55,62%
		T12		188	47,47%	242,25	54,25	28,85%
		L3		266	67,17%	323,33	57,33	21,55%
		S1		396	100,00%	396,00	0,00	0,00%
25	FazaAdamsa1	C7	418	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		114	27,27%	147,05	33,05	28,99%
		T12		204	48,80%	238,24	34,24	16,79%
		L3		288	68,90%	327,24	39,24	13,63%
		S1		418	100,00%	418,00	0,00	0,00%
25	FazaAdamsa2	C7	404	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		110	27,23%	142,12	32,12	29,20%
		T12		188	46,53%	230,26	42,26	22,48%
		L3		272	67,33%	316,28	44,28	16,28%
		S1		404	100,00%	404,00	0,00	0,00%
27	FazaStojaca	C7	326	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		140	42,94%	130,67	9,33	6,66%
		T12		216	66,26%	199,43	16,57	7,67%
		L3		276	84,66%	266,17	9,83	3,56%
		S1		326	100,00%	326,00	0,00	0,00%
27	FazaAdamsa1	C7	376	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		132	35,11%	132,27	0,27	0,21%
		T12		224	59,57%	214,31	9,69	4,33%
		L3		306	81,38%	294,36	11,64	3,80%
		S1		376	100,00%	376,00	0,00	0,00%
27	FazaAdamsa2	C7	366	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		128	34,97%	128,75	0,75	0,59%
		T12		216	59,02%	208,61	7,39	3,42%

Pacjent	Faza	Pomiar	Długość C7-S1 [mm]	Droga przebyta [mm]	% drogi przebytej w fazie	Droga estymowana [mm]	AE drogi est [mm]	Błąd względny [%]
		L3		294	80,33%	286,53	7,47	2,54%
		S1		366	100,00%	366,00	0,00	0,00%
28	FazaStojaca	C7	468	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		182	38,89%	187,59	5,59	3,07%
		T12		302	64,53%	286,29	15,71	5,20%
		L3		398	85,04%	382,11	15,89	3,99%
		S1		468	100,00%	468,00	0,00	0,00%
28	FazaAdamsa1	C7	566	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		192	33,92%	199,11	7,11	3,70%
		T12		320	56,54%	322,60	2,60	0,81%
		L3		444	78,45%	443,11	0,89	0,20%
		S1		566	100,00%	566,00	0,00	0,00%
28	FazaAdamsa2	C7	564	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		190	33,69%	198,41	8,41	4,43%
		T12		316	56,03%	321,46	5,46	1,73%
		L3		444	78,72%	441,54	2,46	0,55%
		S1		564	100,00%	564,00	0,00	0,00%
29	FazaStojaca	C7	478	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		178	37,24%	191,60	13,60	7,64%
		T12		274	57,32%	292,41	18,41	6,72%
		L3		382	79,92%	390,28	8,28	2,17%
		S1		478	100,00%	478,00	0,00	0,00%
29	FazaAdamsa1	C7	570	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		182	31,93%	200,52	18,52	10,18%
		T12		296	51,93%	324,88	28,88	9,76%
		L3		432	75,79%	446,24	14,24	3,30%
		S1		570	100,00%	570,00	0,00	0,00%
29	FazaAdamsa2	C7	562	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		180	32,03%	197,70	17,70	9,84%
		T12		286	50,89%	320,32	34,32	12,00%
		L3		430	76,51%	439,98	9,98	2,32%
		S1		562	100,00%	562,00	0,00	0,00%
30	FazaStojaca	C7	382	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		154	40,31%	153,12	0,88	0,57%
		T12		222	58,12%	233,68	11,68	5,26%
		L3		302	79,06%	311,89	9,89	3,28%
		S1		382	100,00%	382,00	0,00	0,00%
30	FazaAdamsa2	C7	452	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		160	35,40%	159,01	0,99	0,62%
		T12		254	56,19%	257,62	3,62	1,43%
		L3		372	82,30%	353,86	18,14	4,88%
		S1		452	100,00%	452,00	0,00	0,00%
34	FazaStojaca	C7	340	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		154	44,25%	136,29	17,71	11,50%
		T12		220	63,22%	207,99	12,01	5,46%
		L3		288	82,76%	277,60	10,40	3,61%
		S1		340	97,70%	340,00	0,00	0,00%
34	FazaAdamsa1	C7	300	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		150	50,00%	105,54	44,46	29,64%
		T12		192	64,00%	170,99	21,01	10,94%
		L3		272	90,67%	234,86	37,14	13,65%
		S1		300	100,00%	300,00	0,00	0,00%
34	FazaAdamsa2	C7	354	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		158	44,63%	124,53	33,47	21,18%
		T12		222	62,71%	201,77	20,23	9,11%
		L3		302	85,31%	277,14	24,86	8,23%
		S1		354	100,00%	354,00	0,00	0,00%
35	FazaStojaca	C7	486	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		204	41,98%	194,81	9,19	4,50%
		T12		300	61,73%	297,30	2,70	0,90%

Pacjent	Faza	Pomiar	Długość C7-S1 [mm]	Droga przebyta [mm]	% drogi przebytej w fazie	Droga estymowana [mm]	AE drogi est [mm]	Błąd względny [%]
		L3		412	84,77%	396,81	15,19	3,69%
		S1		486	100,00%	486,00	0,00	0,00%
35	FazaAdamsa1	C7	556	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		208	37,41%	195,59	12,41	5,96%
		T12		318	57,19%	316,90	1,10	0,35%
		L3		444	79,86%	435,28	8,72	1,96%
		S1		556	100,00%	556,00	0,00	0,00%
35	FazaAdamsa2	C7	542	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		210	38,75%	190,67	19,33	9,21%
		T12		320	59,04%	308,92	11,08	3,46%
		L3		436	80,44%	424,32	11,68	2,68%
		S1		542	100,00%	542,00	0,00	0,00%
36	FazaStojaca	C7	368	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		130	35,33%	147,51	17,51	13,47%
		T12		228	61,96%	225,12	2,88	1,26%
		L3		288	78,26%	300,46	12,46	4,33%
		S1		368	100,00%	368,00	0,00	0,00%
36	FazaAdamsa1	C7	428	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		148	34,58%	150,57	2,57	1,73%
		T12		236	55,14%	243,94	7,94	3,37%
		L3		340	79,44%	335,07	4,93	1,45%
		S1		428	100,00%	428,00	0,00	0,00%
36	FazaAdamsa2	C7	416	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		138	33,17%	146,34	8,34	6,05%
		T12		228	54,81%	237,10	9,10	3,99%
		L3		326	78,37%	325,68	0,32	0,10%
		S1		416	100,00%	416,00	0,00	0,00%
37	FazaStojaca	C7	294	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		130	44,22%	117,85	12,15	9,35%
		T12		182	61,90%	179,85	2,15	1,18%
		L3		250	85,03%	240,04	9,96	3,98%
		S1		294	100,00%	294,00	0,00	0,00%
37	FazaAdamsa1	C7	314	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		112	35,67%	110,46	1,54	1,37%
		T12		178	56,69%	178,97	0,97	0,54%
		L3		256	81,53%	245,82	10,18	3,98%
		S1		314	100,00%	314,00	0,00	0,00%
37	FazaAdamsa2	C7	320	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		128	40,00%	112,57	15,43	12,05%
		T12		184	57,50%	182,39	1,61	0,88%
		L3		264	82,50%	250,52	13,48	5,11%
		S1		320	100,00%	320,00	0,00	0,00%
38	FazaStojaca	C7	504	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		212	42,06%	202,03	9,97	4,71%
		T12		316	62,70%	308,31	7,69	2,43%
		L3		404	80,16%	411,50	7,50	1,86%
		S1		504	100,00%	504,00	0,00	0,00%
38	FazaAdamsa1	C7	588	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		216	36,73%	206,85	9,15	4,24%
		T12		336	57,14%	335,14	0,86	0,26%
		L3		448	76,19%	460,33	12,33	2,75%
		S1		588	100,00%	588,00	0,00	0,00%
38	FazaAdamsa2	C7	592	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		236	39,86%	208,26	27,74	11,76%
		T12		336	56,76%	337,42	1,42	0,42%
		L3		444	75,00%	463,46	19,46	4,38%
		S1		592	100,00%	592,00	0,00	0,00%
40	FazaStojaca	C7	442	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		190	42,99%	177,17	12,83	6,75%
		T12		286	64,71%	270,39	15,61	5,46%

Pacjent	Faza	Pomiar	Długość C7-S1 [mm]	Droga przebyta [mm]	% drogi przebytej w fazie	Droga estymowana [mm]	AE drogi est [mm]	Błąd względny [%]
		L3		386	87,33%	360,88	25,12	6,51%
		S1		442	100,00%	442,00	0,00	0,00%
40	FazaAdamsa1	C7	468	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		156	33,33%	164,64	8,64	5,54%
		T12		276	58,97%	266,74	9,26	3,35%
		L3		372	79,49%	366,39	5,61	1,51%
		S1		468	100,00%	468,00	0,00	0,00%
40	FazaAdamsa2	C7	504	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		196	38,89%	177,30	18,70	9,54%
		T12		296	58,73%	287,26	8,74	2,95%
		L3		408	80,95%	394,57	13,43	3,29%
		S1		504	100,00%	504,00	0,00	0,00%
43	FazaStojaca	C7	402	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		164	40,80%	161,14	2,86	1,74%
		T12		268	66,67%	245,92	22,08	8,24%
		L3		344	85,57%	328,22	15,78	4,59%
		S1		402	100,00%	402,00	0,00	0,00%
43	FazaAdamsa1	C7	442	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		162	36,49%	155,49	6,51	4,02%
		T12		266	59,91%	251,92	14,08	5,29%
		L3		354	79,73%	346,03	7,97	2,25%
		S1		442	99,55%	442,00	0,00	0,00%
43	FazaAdamsa2	C7	444	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		176	39,64%	156,19	19,81	11,25%
		T12		256	57,66%	253,06	2,94	1,15%
		L3		340	76,58%	347,60	7,60	2,23%
		S1		444	100,00%	444,00	0,00	0,00%
44	FazaStojaca	C7	520	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		180	34,62%	208,44	28,44	15,80%
		T12		324	62,31%	318,10	5,90	1,82%
		L3		440	84,62%	424,57	15,43	3,51%
		S1		520	100,00%	520,00	0,00	0,00%
44	FazaAdamsa1	C7	608	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		198	32,57%	213,89	15,89	8,02%
		T12		360	59,21%	346,54	13,46	3,74%
		L3		504	82,89%	475,99	28,01	5,56%
		S1		608	100,00%	608,00	0,00	0,00%
44	FazaAdamsa2	C7	592	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		190	32,09%	208,26	18,26	9,61%
		T12		344	58,11%	337,42	6,58	1,91%
		L3		484	81,76%	463,46	20,54	4,24%
		S1		592	100,00%	592,00	0,00	0,00%
45	FazaStojaca	C7	278	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		80	28,78%	111,43	31,43	39,29%
		T12		170	61,15%	170,06	0,06	0,04%
		L3		244	87,77%	226,98	17,02	6,98%
		S1		278	100,00%	278,00	0,00	0,00%
46	FazaStojaca	C7	436	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		164	37,61%	174,77	10,77	6,57%
		T12		254	58,26%	266,72	12,72	5,01%
		L3		344	78,90%	355,98	11,98	3,48%
		S1		436	100,00%	436,00	0,00	0,00%
50	FazaAdamsa1	C7	494	4	0,80%	0,00	4,00	
		T6		200	40,16%	173,78	26,22	13,11%
		T12		290	58,23%	281,56	8,44	2,91%
		L3		378	75,90%	386,74	8,74	2,31%
		S1		498	100,00%	494,00	4,00	0,80%
50	FazaAdamsa2	C7	496	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		196	39,52%	174,49	21,51	10,98%
		T12		296	59,68%	282,70	13,30	4,49%

Pacjent	Faza	Pomiar	Długość C7-S1 [mm]	Droga przebyta [mm]	% drogi przebytej w fazie	Droga estymowana [mm]	AE drogi est [mm]	Błąd względny [%]
		L3		380	76,61%	388,31	8,31	2,19%
		S1		496	100,00%	496,00	0,00	0,00%
51	FazaStojaca	C7	336	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		158	47,02%	134,68	23,32	14,76%
		T12		214	63,69%	205,54	8,46	3,95%
		L3		276	82,14%	274,34	1,66	0,60%
		S1		336	100,00%	336,00	0,00	0,00%
51	FazaAdamsa2	C7	380	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		156	40,84%	133,68	22,32	14,31%
		T12		220	57,59%	216,58	3,42	1,55%
		L3		292	76,44%	297,49	5,49	1,88%
		S1		380	99,48%	380,00	0,00	0,00%
52	FazaStojaca	C7	240	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		96	39,34%	96,20	0,20	0,21%
		T12		152	62,30%	146,82	5,18	3,41%
		L3		196	80,33%	195,95	0,05	0,02%
		S1		240	98,36%	240,00	0,00	0,00%
52	FazaAdamsa1	C7	280	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		100	35,71%	98,50	1,50	1,50%
		T12		164	58,57%	159,59	4,41	2,69%
		L3		216	77,14%	219,21	3,21	1,48%
		S1		280	100,00%	280,00	0,00	0,00%
52	FazaAdamsa2	C7	264	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		92	34,85%	92,87	0,87	0,95%
		T12		156	59,09%	150,47	5,53	3,55%
		L3		206	78,03%	206,68	0,68	0,33%
		S1		264	100,00%	264,00	0,00	0,00%
53	FazaStojaca	C7	316	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		132	41,77%	126,67	5,33	4,04%
		T12		192	60,76%	193,31	1,31	0,68%
		L3		256	81,01%	258,01	2,01	0,78%
		S1		316	100,00%	316,00	0,00	0,00%
53	FazaAdamsa2	C7	352	0	0,00%	0,00	0,00	
		T6		128	36,36%	123,83	4,17	3,26%
		T12		200	56,82%	200,63	0,63	0,31%
		L3		268	76,14%	275,57	7,57	2,83%
		S1		352	100,00%	352,00	0,00	0,00%