

dr hab. Jarosław Bylina
Instytut Informatyki i Matematyki
Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej
Pl. M. Curie-Skłodowskiej 5
20-031 Lublin
email: jaroslaw.bylina@umcs.pl

Lublin, 7 listopada 2025

Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy:	Metody wspomagające precyzję dokowania systemów AGV do stanowiska montażowego
Autor rozprawy:	mgr inż. Piotr Biernacki
Promotor rozprawy:	dr hab. inż. Adam Ziębiński, prof. PŚ
Dziedzina:	nauki inżynieryjno-techniczne
Dyscyplina:	informatyka techniczna i telekomunikacja

1 Tematyka rozprawy i jej aktualność

Pan magister inżynier Piotr Biernacki poświęcił swoją rozprawę problemowi precyzyjnego autonomicznego dokowania systemów AGV do stanowiska montażowego. Z punktu widzenia wszechobecnej automatyzacji jest to problem znaczący. Powtarzalność i dokładność dokowania bez udziału człowieka (lub z jego bardzo ograniczonym udziałem) jest kluczowa dla usprawnienia wielu procesów technologicznych.

Wybór tematu jest dobrze uzasadniony — motywowany jest bowiem realnymi problemami i potrzebami ciągłego rozwoju metod i technologii związanych z automatyzacją, która staje się z dnia na dzień coraz ważniejsza.

2 Zawartość i charakter rozprawy

Rozdział 1 stanowi wstęp do pracy. W rozdziale 2 przedstawiono przegląd literatury dotyczącej zagadnień omawianych w pracy — natomiast kolejne rozdziały prezentują autorskie badania i osiągnięcia Doktoranta. Rozdział 3 opisuje badania charakterystyki pomiarowej czujników odległości. W kolejnym rozdziale (4) opisano opracowane metody kalibracji pomiarów odległości w celu poprawy ich dokładności. Rozdział 5 poświęcono analizie metod filtracji danych z LiDARów 2D w kontekście zwiększenia precyzji pomiarów. W rozdziale 6 zaprezentowane zostały badania i metody kalibracji danych odometrycznych uzyskiwanych z platformy AGV. Następny rozdział (7) zawiera opis opracowanego znacznika przestrzennego z elementami odblaskowymi oraz metody jego lokalizacji i identyfikacji. W rozdziale 8 przedstawiono system akwizycji danych i kontroli platformy mobilnej integrujący opracowane metody. Rozdział 9 obejmuje wyniki testów eksperymentalnych z wykorzystaniem prototypowej platformy AGV podczas procedur dokowania. Ostatni rozdział (10) stanowi opis weryfikacji skuteczności opracowanych metod i ich zgodności z założeniami projektu (w ramach którego badania były prowadzone) — tym samym służąc za podsumowanie pracy.

Na końcu mamy trzy dodatki zawierające (kolejno): używane symbole i skróty, spis publikacji i patentów oraz tabele z wynikami kalibracji przy użyciu metod uczenia maszynowego. Szczególnie dwa pierwsze z nich są bardzo pomocne przy czytaniu pracy.

Całość rozprawy to samodzielne, pełne dzieło, które stanowi kompleksowe opracowanie metod i systemu zwiększającego niezawodność dokowania autonomicznych platform mobilnych do stanowisk montażowych.

3 Teza i cel rozprawy

Doktorant przedstawia tezę następującą — a właściwie są to cztery ściśle ze sobą związane tezy, mianowicie:

- 1. Zastosowanie metod kalibracji pozwala na zwiększenie dokładności pomiarów z czujników.*

2. Zastosowanie metod filtracji pozwala na zwiększenie precyzji pomiarów z czujników.
3. Zastosowanie znacznika przestrzennego pozwala na dokładne pozycjonowanie stanowiska montażowego.
4. Zastosowanie metod zmniejszających błędy pomiarowe zwiększa dokładność dokowania.

Teza sformułowana jest poprawnie i jasno — choć może nieco zbyt szczegółowo. Odzwierciedla jednak dokładnie to, co Doktorant w swojej pracy robi. Teza jest oryginalna i znacząca w kontekście *Informatyki technicznej i telekomunikacji*. Dzięki postawionemu celowi (sformułowanemu w pracy następująco: *opracowanie metod wpływających na zwiększenie precyzji dokowania systemów AGV do wymaganego punktu dla danego stanowiska montażowego, poprzez zwiększenie precyzji i dokładności podsystemów pomiarowych oraz zastosowanie metody pozycjonowania na bazie znacznika przestrzennego*), Autor dąży do rozwiązania problemu i udowodnienia tez. Cała rozprawa świadczy o tym, że mu się to udaje.

4 Analiza źródeł i zastany stan wiedzy

Bibliografia recenzowanej rozprawy doktorskiej obejmuje 103 pozycje (głównie są to artykuły naukowe i niekiedy źródła internetowe). Są one cytowane w odpowiednim kontekście. Źródła pokazują stan wiedzy — co widać szczególnie dobrze w początkowych rozdziałach pracy, gdzie wiele razy Autor odnosi się do aktualnej literatury.

W większości mamy do czynienia ze źródłami nowymi, mocno współczesnymi (najnowsze to bieżący rok). Dobór ich pokazuje wyraźnie, że tematyka jest współcześnie badana, że zainteresowanie nią nie maleje i że potrzeby rozwoju są wyraźne.

5 Oryginalny wkład Autora w dyscyplinę i jego znaczenie

Niewątpliwie można przypisać Autorowi szereg istotnych oryginalnych osiągnięć.

- Opracowanie metody kalibracji adaptacyjnej pozwalającej na znaczącą redukcję błędów pomiarowych czujników odległości — poprzez branie pod uwagę charakterystyki błędów pomiarowych.
- Opracowanie metody kalibracji adaptacyjnej z filtracją medianową umożliwiającą jeszcze dokładniejszą kalibrację czujników odległości dzięki dodaniu filtracji medianowej.
- Opracowanie metod kalibracji naturalnej i resztowej z wykorzystaniem uczenia maszynowego, które pozwoliły na zmniejszenie błędów pomiarowych czujników odległości do poziomu poniżej 1 mm.

- Opracowanie metod oceny jakości i kalibracji odometrii, redukujących kumulujące się błędy systematyczne w danych odometrycznych.
- Przeprowadzenie badań metod filtracji danych z czujników LiDAR, w tym filtracji medianowej, która znacząco obniżyła odchylenie standardowe pomiarów.
- Opracowanie refleksyjnego znacznika przestrzennego wraz z metodą jego detekcji i identyfikacji, umożliwiającą dokładne pozycjonowanie i identyfikację elementów stanowiska montażowego.
- Stworzenie autorskiego systemu dokowania, integrującego metody kalibracji, detekcji znaczników, komunikacji z platformą oraz weryfikacji pozycji po zadokowaniu.
- Przeprowadzenie badań wpływu opracowanych metod kalibracji i systemu pozycjonowania na dokładność dokowania prototypowego systemu AGV, potwierdzających wzrost precyzji dzięki autorskim rozwiązaniom.
- Zaprojektowanie procesu weryfikacji pozycji AGV po zadokowaniu, umożliwiającego obliczenie korekt pozycji i orientacji pojazdu do dalszych zadań produkcyjnych.
- Weryfikacja skuteczności wszystkich opracowanych metod i systemów w warunkach eksperymentalnych, potwierdzająca ich wpływ na zwiększenie dokładności dokowania i pozycjonowania.

Opracowane w ramach rozprawy metody, algorytmy i systemy mają istotne znaczenie dla rozwoju dyscypliny *Informatyka techniczna i telekomunikacja*, ponieważ łączą zaawansowane techniki przetwarzania danych sensorycznych, kalibracji i uczenia maszynowego z praktycznymi zastosowaniami w systemach autonomicznych. Wprowadzenie nowych metod kalibracji czujników odległości i odometrii przyczynia się do zwiększenia dokładności i niezawodności pomiarów w systemach stanowiących podstawę współczesnej automatyki, robotyki i Internetu Rzeczy (IoT). Dzięki temu możliwe staje się tworzenie bardziej precyzyjnych i adaptacyjnych systemów lokalizacji, co jest kluczowe dla autonomicznych pojazdów, robotów mobilnych oraz inteligentnych systemów przemysłowych.

Znaczący wkład w dyscyplinę stanowi również opracowanie pomysłowego refleksyjnego znacznika przestrzennego i związanych z nim metod detekcji oraz identyfikacji. To rozwiązanie pozwala na skuteczne pozycjonowanie i weryfikację przestrzenną z wykorzystaniem standardowych sensorów LiDAR 2D, bez konieczności stosowania kosztownych systemów wizyjnych czy zewnętrznej infrastruktury nawigacyjnej. Takie podejście wpisuje się w aktualne kierunki badań nad prostymi, ekonomicznymi i niezawodnymi metodami pozycjonowania w środowiskach przemysłowych oraz logistycznych.

Opracowany system dokowania integruje wiele autorskich metod kalibracji, filtracji i analizy danych w spójny system. Jego zastosowanie umożliwia weryfikację i automatyzację procesów przemysłowych z wysoką precyzją. W szczególności rozwinięto tu podejścia umożliwiające automatyczne dostrajanie parametrów czujników oraz dynamiczną

korekcję błędów w czasie rzeczywistym, co stanowi krok w stronę inteligentnych, samo-
optymalizujących się systemów pomiarowych.

Wyniki badań przedstawionych w rozprawie przyczyniają się do rozwoju metod inte-
gracji sensorów, przetwarzania danych pomiarowych oraz projektowania systemów stero-
wania. Proponowane rozwiązania mogą być z powodzeniem adaptowane do innych obsza-
rów, takich jak nawigacja pojazdów autonomicznych czy diagnostyka przemysłowa. Tym
samym rozprawa wnosi znaczący wkład w rozwój dyscypliny.

6 Redakcja rozprawy i prezentacja wyników

Struktura pracy jest uporządkowana i przejrzysta. Podział na poszczególne rozdziały
jest logiczny. Pracę dobrze się czyta — napisana jest starannie zarówno pod względem
językowym, jak i typograficznym (mimo drobnych podknień). Szczególnie podkreślić na-
leży dobór odpowiedniego narzędzia do składu (L^AT_EX). Bez większych zarzutów należy
też odnieść się do wyglądu, opisu i czytelności ilustracji, wykresów oraz tabel — których
jest bardzo dużo, co wspaniale poprawia odbiór pracy. Kolejnym, wartym wyróżnienia,
drobiazgiem jest zastosowanie wewnętrznych odnośników w elektronicznej wersji pracy
(w formacie PDF), co bardzo ułatwia jej przeszukiwanie i przeskakiwanie między jej róż-
nymi miejscami.

7 Słabe strony i uwagi krytyczne

Oczywiście, w tej pracy znaleźć możemy pewne braki.

- W pracy nieco swobodnie używane są terminy ‘precyzja’ oraz ‘dokładność’ — dobrze
byłoby zdefiniować, jak są one rozumiane.
- Czy ma sens zaprezentowany sposób dzielenie przedziału odległości na sekcje w ka-
libracji adaptacyjnej? W przypadku mocno „zębatych” odczytów powstaje bardzo
dużo podprzedziałów (i tyleż funkcji składowych). Czy to nie rzutuje na złożoność
i efektywność algorytmu? Czy nie dałoby się jakoś wygładzić odczytów przed po-
działem?
- W ogóle, trochę brakuje w rozprawie rozważań na temat złożoności obliczeniowej
i realnej efektywności prezentowanych algorytmów — oraz jej wpływu na przygo-
towanie platformy i na samą jej pracę.
- W szczególności, takie rozważania powinny być podjęte w przypadku stosowania
algorytmów uczenia maszynowego.
- Odometria jako źródło danych o ruchu z natury rzeczy pozostawia wiele do życzenia
— ale czy nie należałoby rozważyć dodatkowych udokładnień (biorąc pod uwagę
odkształcenia opon zależne być może od temperatury i ciężaru ładunku platformy;
mierząc niedokładności w rychu do tyłu, a nie tylko do przodu it

- W mniejszym stopniu dotyczy to także innych pomiarów — bowiem mocno ograniczony jest zakres badań eksperymentalnych ze względu na warunki środowiskowe (np. zmienne oświetlenie, zakłócenia, powierzchnie o różnych właściwościach refleksyjnych).
- Platforma używana w badaniach była prototypem, więc nie było możliwości odniesienia się do innych egzemplarzy — ale przynajmniej teoretycznie należałoby rozważyć, na ile te hipotetyczne inne egzemplarze mogą odbiegać od prototypu i jak wielki wpływ może to mieć na opracowane metody.
- W związku z poprzednim pozostaje brak poważniejszych rozważań na temat uniwersalności metod opracowanych przez Doktoranta i ich możliwej przenośności na inne maszyny/systemy.
- Liczne tabele w rozprawie dostarczają wielu ciekawych danych, ale czasem ich prezentacja jest nieco nieczytelna — być może wyróżnienie niektórych elementów byłoby wskazane.
- Odmianę polską słów obcych i skrótowców piszemy raczej łącznie, małymi literami wewnątrz, bez łącznika ('Lidaru', nie 'LiDAR-u', choć piszący te słowa wołi w tej sytuacji 'LiDARu'). Co więcej, w języku polski słowo to funkcjonuje już jako w pełni przyswojone zapożyczenie — a więc 'lidar' (jak 'radar' i 'sonar').

Nie są to oczywiście usterki umniejszające w jakikolwiek sposób merytoryczną wartość pracy — która w oczach recenzenta pozostaje wysoka.

8 Podsumowanie i wniosek końcowy

Po analizie rozprawy mogę z pewnością stwierdzić, że jest ona bardzo dobrze przygotowana i wnosi znaczący wkład w dyscyplinę *Informatyka techniczna i telekomunikacja*. Potwierdza ona też zdolność Kandydata do prowadzenia dalszej pracy naukowej samodzielnie. Świadczy również o ugruntowanej wiedzy ogólnej Autora w zakresie nauk inżyniersko-technicznych i szczegółowej wiedzy odpowiadającej zakresowi badań.

W związku z powyższym, stwierdzam, że recenzowana rozprawa pt. „Metody wspomagające precyzję dokowania systemów AGV do stanowiska montażowego” spełnia warunki określone w odpowiedniej Ustawie, a więc wnioskuję o dopuszczenie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Piotra Biernackiego do publicznej obrony i dalszych etapów postępowania doktorskiego.

Jarosław Bylina