

**Piotr Tulik, dr hab. inż.**

Politechnika Warszawska

Wydział Mechatroniki

Institut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej

**Wydział  
Mechatroniki**

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

**Recenzja  
rozprawy doktorskiej  
mgr. inż. Pawła Bzowskiego  
„Metody elastycznego dopasowania obrazów medycznych  
w zastosowaniach do różnych technik obrazowania”**

Promotor:

dr hab. inż. Damian Borys

**Podstawa opracowania recenzji.**

Recenzja została opracowana na podstawie pisma Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna Politechniki Śląskiej prof. dr hab. inż. Ewy Piętki (RDIB.002.79.2023) z dnia 17 lipca 2023 r. oraz ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742).

**Ocena układu rozprawy doktorskiej.**

Rozprawa napisana jest w języku polskim i zawiera 134 strony. Część główna pracy (strony 1 ÷ 102) składa się z pięciu rozdziałów: wstęp; materiały i metody; wyniki; dyskusja oraz podsumowanie. Poza częścią główną praca zawiera (strony I ÷ VI) podziękowania i spis treści oraz (strony VI ÷ XXXI) bibliografię oraz dodatki: spis skrótów i symboli; spis rysunków; spis tablic; streszczenia i słowa kluczowe w języku polskim oraz angielskim.

Opierając się na tytułach rozdziałów części głównej rozprawy można przypuszczać, że ma ona układ typowy dla prac naukowych, jednak zapoznanie się z treścią poszczególnych rozdziałów zdecydowanie temu zaprzecza. Szczególnie widoczne jest to w rozdziale zatytułowanym *Wyniki*, gdzie Autor przedstawia wyniki, jak również ich dyskusje oraz opisy zastosowanych w rozprawie metod. Z tego względu układ rozprawy należy uznać za nietypowy i błędny z punktu widzenia prezentowania prac naukowych.

**Omówienie treści i ocena ogólna rozprawy doktorskiej.**

Ze względu na liczne krytyczne i polemiczne uwagi dotyczące rozprawy zostaną one przedstawione przy opisie treści każdego z rozdziałów zgodnie z kolejnością ich występowania. W recenzji przedstawiam wyłącznie najistotniejsze w moim przekonaniu uwagi dotyczące ocenianej rozprawy.

## Rozdział 1 Wstęp

W pierwszym akapicie tego rozdziału Autor prowadzi ogólny wywód dotyczący diagnostycznych i terapeutycznych procedur medycznych ze wskazaniem szkodliwego działania promieniowania jonizującego na organizm ludzki, starając się wykazać jak ważny dla jakości tych procedur może być proces dopasowania obrazów medycznych. Niezrozumiałe dla mnie jest nawiązywanie, w kontekście tematyki oraz treści rozprawy, do skutków oddziaływania promieniowania jonizującego na organizmy żywe. Dodatkowo wywód ten jest chaotyczny i zawiera szereg błędów. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć:

str. 1: *„Penetrująca wiązka promieniowania (...) uszkodza komórki tkanek, przez które przechodzi. Prowadzi to do jonizacji ośrodka, z którym oddziałuje i w efekcie śmierci komórki.”*

Z tych zdań można wnioskować, że każde oddziaływanie promieniowania jonizującego z tkanką spowoduje śmierć komórki, co nie jest zgodne z prawdą.

str. 1 i inne: *„terapeuta”*

Poprawnie powinno być „radioterapeuta” lub „lekarz specjalista radioterapii onkologicznej”.

str. 1: *„wyniszczenie zmiany nowotworowej”*

Błędnie użyty wyraz „wyniszczenie”.

str. 1: *„Promieniowanie jednak nie działa wybiórczo i w podobny sposób oddziałuje z tkanka zdrowa, przez co w wyniku interakcji z zdrowymi tkankami (...)”*

Błędnie użyty wyraz „interakcja”.

Podrozdział 1.1 zawiera opis wybranych metod dopasowania obrazów medycznych dzieląc je według powszechnie znanych kryteriów. Opis ten przedstawia przegląd literatury dotyczący obecnego stanu wiedzy w tym zagadnieniu. Przegląd ten można uznać za dostateczny, brakuje mu jednak przemyślanej systematyki i przejrzystości, a przede wszystkim nie zawiera sprecyzowanego umiejscowienia tematyki rozprawy doktorskiej na tle omawianych treści. Dodatkowo podrozdział ten zawiera liczne błędy, m.in. Autor używa w tekście tego akapitu niepoprawnych i nieprecyzyjnych sformułowań takich jak:

str. 2: *„W przypadku wewnętrznych metod nałożenia obrazów skupiamy się na zawartości obrazu generowanego przez pacjenta.”*

Pacjent nie generuje obrazu. Trudno też stwierdzić, czym jest „zawartość obrazu”.

str. 3: *„Jest to metoda dobra i bardzo dobrze sprawdza się (...)”*

Sformułowanie to jest, co najmniej nieprecyzyjne.

Podrozdział 1.2 poświęcony został opisowi podstawowych technik obrazowania medycznego (rezonans magnetyczny, ultrasonografia, rentgenografia, mammografia, rentgenowska tomografia komputerowa oraz obrazowanie z użyciem radioizotopów). Zawartość tego rozdziału można w ogólności uznać za powiązaną z tematyką rozprawy doktorskiej, jednak przedstawianie szczegółowych opisów tych technik, głównie budowy urządzeń i ich elementów składowych (np. lampy RTG), wydaje się zbędne w kontekście tematyki pracy. W tak zatytułowanej rozprawie zdecydowanie bardziej wartościowe byłoby omówienie podstaw powstawania obrazów w tych technikach (w tym metod rekonstrukcji w technikach tomograficznych), a przede wszystkim przedstawienie podstawowych parametrów obrazów dla każdej z tych technik. Poza tym, obrazy uzyskane tylko niektórymi z tych technik były analizowane w pracy. Nie zrozumiałe jest również całkowite pominięcie zagadnień dotyczących stosowanej powszechnie fuzji obrazów medycznych.

Dodatkowo podrozdział ten zawiera następujące błędy:

str. 7: *„Dział ten zajmuje się generowaniem obrazów zmian fizjologicznych i patologicznych w ludzkim ciele (...)”*

Diagnostyka obrazowa nie generuje obrazów. Poza tym obrazowane są nie tylko zmiany fizjologiczne i patologiczne, ale całe ciało lub wybrany jego fragment, często o prawidłowej budowie i metabolizmie.

- str. 8: „*Jezeli lekarz diagnosta wymaga oceny wychwytu białka czy hormonu to izotop jest podłączany właśnie pod tą substancję. Pozwala to na śledzenie i obserwacje badanej cząstki w ciele ludzkim.*”  
Nieprawidłowe jest użycie wyrazu „cząstka”. Określenie „cząstka” w naukach ścisłych jest zarezerwowane dla cząstek elementarnych lub układu cząstek elementarnych związanych siłami jądrowymi, tj. elektron, proton, neutron. Niepoprawne jest również sformułowanie, że „*izotop jest podłączany pod tą substancję*”. Prawdopodobnie Autor miał na myśli cząsteczkę chemiczną, a w zasadzie radiofarmaceutyk powstający najczęściej poprzez połączenie izotopu promieniotwórczego i odpowiedniego ligandu. Dodatkowo techniki obrazowania stosowane w medycynie nuklearnej nie pozwalają obserwować pojedynczej cząstki w ciele ludzkim.
- Str. 8: „*<sup>99m</sup>Tc (radioizotop stosowany głównie w diagnostyce tarczycy i przytarczyc w badaniach scyntygraficznych).*”  
Izotop <sup>99m</sup>Tc jest powszechnie stosowany w diagnostyce scyntygraficznej. W praktyce tylko pojedyncze badania scyntygraficzne w konkretnych wskazaniach wykonuje się z użyciem innych izotopów promieniotwórczych. Twierdzenie, że <sup>99m</sup>Tc jest stosowany głównie do diagnostyki chorób tarczycy i przytarczyc jest, co najmniej nadużyciem.
- str. 10: „*Wytworzona fala dźwiękowa o znanej długości penetruje ośrodek, odbija się i wraca do elementu piezoelektrycznego (...)*”  
Autor nie precyzuje, w jakich warunkach następuje odbicie fali ultradźwiękowej, co ma zasadnicze znaczenie w obrazowaniu tą techniką.
- str. 10: „*Badanie USG jest jedną z najbardziej popularnych i najczęściej używanych metod. Nie wykorzystuje promieniowania jonizującego, co sprawia, że jest to metoda bezpieczna oraz nie wymaga dużej infrastruktury oraz dodatkowego przygotowania pacjenta.*”  
Stwierdzenie, że badanie USG nie wymaga przygotowania pacjenta, jest błędne.
- str. 10: „*W obecnych czasach aparaty USG nie zajmują wiele miejsca i często są wykorzystywane w gabinetach lekarzy POZ.*”  
Stwierdzenie, że ultrasonografy stanowią wyposażenie gabinetów lekarzy POZ jest nieuprawnione. Urządzenia te powinny być używane w pracowniach ultrasonograficznych, wobec których określone są konkretne wymagania, m.in. minimalne kwalifikacje personelu medycznego.
- str. 11: „*Rentgen (RTG) / Mammografia*”  
Błędnie użyty wyraz „Rentgen”, poprawnie powinno być „radiografia”.
- str. 11: „*Odkrycie tego promieniowania przypisuje się Wilhelmowi Roentgenowi.*”  
Wilhelm Roentgen odkrył promieniowanie X, zatem sformułowanie, że jest mu to przypisywane jest błędne.
- str. 11: „*Promieniowanie to jest przenikliwe dla ludzkiego ciała.*”  
Ciało ludzkie jest przenikliwe dla promieniowania X, a nie na odwrót.
- str. 11: „*Badanie polega na umieszczeniu badanej piersi pomiędzy płytkami, które odpowiednio ścisną piers.*”  
Badanie mammograficzne wymaga kompresji piersi. Kompresja ta wykonywana jest pomiędzy płytką kompresującą, a stołem (zawierającym detektor) mammografu.
- str. 11: „*W kolejnym etapie wykonywana jest akwizycja obrazu za pomocą lampy rentgenowskiej.*”  
Lampa RTG emituje wiązkę promieniowania, za rejestrację obrazu odpowiada detektor. Określenie „akwizycja” powinno być w szczególności zarezerwowane dla rejestracji obrazów metodami medycyny nuklearnej.
- str. 11: „*Odpowiednio zrekonstruowany obraz jest następnie oceniany przez lekarza radiologa.*”  
W mammografii standardowy obraz planarny nie jest rekonstruowany.

str. 11: „*Pomimo zastosowania promieniowania jonizującego jest to metoda bezpieczna z powodu stosowania tzw. promieniowania nisko-dawkowego, czyli odpowiedniego dopasowania parametrów akwizycji, tak aby otrzymana dawka przez pacjentkę była jak najmniejsza.*”

Pojęcie „*promieniowanie nisko-dawkowe*” nie jest mi znane. Podczas badania dobierane są parametry ekspozycji, a nie jak pisze Autor „*akwizycji*”. Dodatkowo w każdym badaniu radiograficznym stosowana jest optymalizacja parametrów ekspozycji w odniesieniu do jakości obrazu diagnostycznego i narażenia pacjenta. Badanie mammograficzne nie jest uznawane za „*metodę bezpieczną*”, czego konsekwencją jest ustalona dolna granica wieku kobiet, które są poddawane temu badaniu oraz częstotliwość wykonywania tych badań.

str. 12: „*Aparat tomografii komputerowej składa się z lampy RTG umieszczonej na okrągłym torze wewnątrz obudowy aparatu i umieszczonych naprzeciw lampy sekcji detektorów. Ruch lampy i sekcji detektorów odbywa się z dużą prędkością zataczając kolejne okrążenie wokół pacjenta.*”

Opis ten dotyczy rentgenowskich tomografów komputerowych trzeciej generacji, które praktycznie nie są już używane. Obecnie w tych urządzeniach detektory są umieszczone na pierścieniu i są nieruchome. Podczas badania porusza się wyłącznie lampa RTG.

str. 13: „*Obrazowanie metoda PET-CT (...). Podstawowym emiterem promieniowania jest pacjent.*”

Pacjent nie jest emiterem promieniowania. Promieniowanie jest emitowane przez zgromadzony w ciele pacjenta radiofarmaceutyk, a w szczególności izotop promieniotwórczy wchodzący w jego skład.

str. 14: „*Standardowo badanie jest wykonywane w pozycji na plecach z rękami uniesionymi ponad głowę. Tak ułożony pacjent przejeżdża przez gantry aparatu pozwalając na rejestrację sygnału na detektorach.*”

Na tym etapie badania pacjent nie ma już formalnego wpływu na rejestrację sygnału. Dodatkowo podczas badania pacjent leży na stole aparatu i to stół wykonuje ruch, a nie sam pacjent. Sygnał jest rejestrowany przez detektory, a nie „*na detektorach*”.

str. 15: „*Promieniowanie, które pokona grubość kolimatora dociera do scyntyлятора.*”

Kolimator posiada otwory i to przez te otwory promieniowanie dociera do kryształu scyntyacyjnego. Jest to podstawa obrazowania z użyciem kamery scyntyacyjnej. Z założenia kolimatory są tak projektowane, aby przez otwory kolimatora przechodziło tylko promieniowania fotonowe o określonym przez okno energetyczne spektrum energii. Materiał kolimatora pochłania promieniowanie.

Podrozdział 1.3 Nowotwory poświęcony został zagadnieniom związanym z chorobami onkologicznymi, ze szczególnym uwzględnieniem nowotworów piersi. Znajduje się tu również opis anatomii piersi oraz informacje dotyczące diagnostyki i terapii nowotworów piersi. Wyjątkowo można uznać, że treści te są zasadne z punktu widzenia tematyki pracy, choć trudno zrozumieć brak jakiegokolwiek nawiązania w dalszej treści rozprawy do przedstawionych w tym podrozdziale informacji. Należy się jednak zastanowić, czy poprawne jest pominięcie w tym rozdziale omówienia anatomii innych części ciała, których obrazy byłyby analizowane w dalszej części rozprawy (nadgarstka i klatki piersiowej). Dodatkowo w moim przekonaniu w kontekście nawiązania przez Autora w treści rozprawy do nowotworów piersi zabrakło podstawowych informacji na temat specyfiki obrazowania i parametrów obrazów tkanek piersi, z uwzględnieniem obrazowania zmian nowotworowych. Poza tym Autor podobnie jak we wcześniejszych podrozdziałach używa w tekście tego akapitu niepoprawnych i nieprecyzyjnych sformułowań takich jak:

str. 17: „*Z czego pośród mężczyzn najczęstszym nowotworem jest nowotwór płuc, który w samym 2020 roku pozbawił życia ok. 1 miliona mężczyzn.*”

str. 17: „*Jest to również bardzo niebezpieczny nowotwór (...)*”

W podrozdziale 1.4 Autor formułuje następujący cel pracy:

*„Celem pracy jest opracowanie metodologii oraz optymalizacja dopasowania obrazów medycznych różnych modalności oraz w różnych ułożeniach ciała pacjenta.”*

Pomijając błędne użycie pojęcia „metodologia”, cel ten należy uznać za bardzo ogólny i tym samym trudny do jednoznacznej oceny. Autor w kolejnych zdaniach tego podrozdziału syntetycznie przedstawia użyte w pracy metody oraz przebieg realizacji celu pracy. W dalszej części przedstawia uzasadnienie celowości wykorzystania metod usprawniających diagnostykę, pomimo, że poświęca temu kolejny podrozdział (1.5).

Moim zdaniem cel pracy został sformułowany niejednoznacznie i nie jest skorelowany w żaden konkretny sposób ze stanem wiedzy w dyskutowanym obszarze. Z tego względu nie jest możliwe jednoznaczne pozytywne ocenienie celu pracy sformułowanego w rozprawie. Autor obok celu pracy, powinien przedstawić zakres oraz podstawowe założenia pracy w taki sposób, aby następnie móc klarownie wykazać ich spełnienie w treści rozprawy.

W podrozdziale 1.5 Autor prezentuje uzasadnienie badań. Jak wspomniałem wcześniej, częściowe uzasadnienie znajduje się już w podrozdziale 1.4. Opis skupia się tu głównie na problemach z dopasowaniem obrazów wynikających z ułożenia pacjenta, w szczególności obrazów gruczołu piersiowego. Sugeruje jednocześnie, że możliwe i potrzebne jest dopasowanie obrazów piersi uzyskanych technikami tomograficznymi (rentgenowska tomografia komputerowa) z technikami planarnymi (mammografia). Należy podkreślić, że są to dwa całkowicie różne obrazy charakteryzujące się zdecydowanie różnymi parametrami (np. rozdzielczością), dodatkowo mają one całkiem odmienną rolę diagnostyczną, z tego powodu takie sformułowanie budzi we mnie głębokie wątpliwości. Autor stwierdza również: *„Dodatkową zaletą zastosowania metod przetwarzania obrazu jest uniknięcie wykonywania badań w innych pozycjach, by było możliwe porównanie danego badania z innym badaniem w odmiennnej pozycji.”* Biorąc pod uwagę metody obrazowania gruczołu piersiowego, takie stwierdzenie uważam za bezpodstawne, każda z metod obrazowania ma swój cel diagnostyczny i do tego celu dopasowane jest ułożenie pacjenta.

W podrozdziale 1.6 Autor formułuje tezy pracy:

*„Dopasowanie obrazów odpowiednio dobranymi metodami pozwala na lepsze porównywanie obrazów tych samych modalności jak i obrazów różnych modalności, niż w przypadku porównywania obrazów wizualnie. Skuteczne dopasowanie obrazów medycznych zwiększa wartość diagnostyczną badań, co z kolei przekłada się na jakość leczenia pacjenta. Dopasowanie obrazów daje lepszą informację komplementarną, czyli bardziej złożoną informację z połączonych badań, niż z każdego osobno. Odpowiednio dobrany algorytm pozwala na poprawne dopasowanie obu zestawów danych obrazowych.”*

Tak postawione tezy w kontekście rozprawy doktorskiej są sformułowane bardzo ogólne i są znane powszechnie, żadna z nich nie wskazuje jednoznacznie, że rozprawa doktorska dotyczy oryginalnego rozwiązania problemu naukowego. Dodatkowo można uznać niektóre z tych tez za nie do końca zasadne: nie zawsze dopasowanie obrazów zwiększy wartość diagnostyczną badań; wartość diagnostyczna badań nie zawsze przełoży się na jakość leczenia pacjenta; dopasowanie obrazów nie zawsze da lepszą informację komplementarną niż każdy obraz osobno, głównie z powodu specyfiki poszczególnych obrazów.

Podsumowując powyższe uwagi stwierdzam, że cel rozprawy oraz postawione przez Autora tezy pracy są bardzo ogólnikowe. Autor nie wykazał ich oryginalności w odniesieniu do obecnego stanu wiedzy i nie sprecyzował zakresu i założeń pracy. Należy to w kontekście jej realizacji oraz oceny uznać za znaczący błąd. Dodatkowo w mojej opinii, część teoretyczna pracy jest nieadekwatna do jej tytułu i jest niewystarczająca z punktu widzenia tematyki rozprawy. Głównym uchybieniem jest brak przedstawienia specyfiki (w tym

parametrów) obrazów uzyskanych różnymi technikami. Poza tym treść tego rozdziału zawiera szereg istotnych błędów merytorycznych, co budzi wątpliwości dotyczące podstawowej wiedzy Autora.

Reasumując, sformułowanie celu rozprawy, przedstawienie podjętego problemu naukowego oraz ogólną wiedzę teoretyczną Autora z zakresu dotyczącego tematyki rozprawy oceniam negatywnie.

## Rozdział 2 Materiały i metody

Z zasady treść tego rozdziału dotyczy używanych przez Autora materiałów i metod. Brak poprawnego sformułowania przez Autora zakresu i założeń pracy zdecydowanie jednak utrudnia ocenę merytoryczną tego rozdziału, a tym samym ocenę zastosowanych materiałów i metod podczas realizacji rozprawy doktorskiej.

Dodatkowo w moim przekonaniu Autor w sposób niewystarczający zaznacza, które z przedstawionych metod i materiałów zostały opracowane w ramach niniejszej rozprawy

W podrozdziale 2.1 Autor przedstawia opis danych wykorzystywanych podczas realizacji celu pracy. Obrazy rzeczywiste to obrazy medyczne: MRI kości nadgarstka; PET/CT oraz MRI klatki piersiowej; CT jamy brzusznej. Obrazy syntetyczne trzech różnych figur zostały przygotowane w programie GIMP. Autor nie uzasadnia, dlaczego użyto takich a nie innych kształtów, co powinno mieć miejsce. Poza tym, jeżeli obrazy syntetyczne zostały utworzone przez Autora, należało rozważyć ich przedstawienie i opis w rozdziale dotyczącym realizacji celu pracy, a nie w opisie materiałów i metod.

W podrozdziale 2.2 Autor przedstawia opis prowadzonych badań. Pierwszy akapit tego podrozdziału zawiera powielone treści poprzedniego podrozdziału. Natomiast przedmiotowy opis prowadzonych badań przedstawiony jest w formie pojedynczych zdań, przeplatanych informacjami o wynikach. Charakter tego rozdziału w mojej opinii (poza opisem stosowanego w pracy oprogramowania) nie pasuje do rozdziału dotyczącego materiałów i metod. Opis ten powinien znaleźć się w rozdziale dotyczącym realizacji celu pracy lub we wstępie do rozdziału dotyczącego wyników. Dobór oprogramowania do realizacji rozprawy można uznać za właściwy, jednak mankamentem jest brak opisów używanych przez Autora gotowych rozwiązań MIRT oraz Tool of Kronn. Ma to szczególne znaczenie ponieważ do tych rozwiązań Autor odnosi uzyskane wyniki w dalszej części rozprawy.

W podrozdziale 2.3 Autor przedstawia metody przetwarzania obrazu oraz metody oceny podobieństwa obrazów wykorzystane podczas realizacji pracy. Autor nie uzasadnia w sposób jednoznaczny wyboru tych metod, w szczególności w odniesieniu do prowadzonych badań. Istotnym mankamentem przy opisie metod oceny podobieństwa obrazów jest brak szczegółowej informacji dotyczącej sposobu interpretacji wyników otrzymanych za pomocą tych metod, co jest kluczowe przy ocenie wyników badań. Dodatkowo część z tych opisów nie posiada odnośników literaturowych, co powinno mieć miejsce. Podrozdział ten zawiera nieścisłości opisów utrudniające analizę dalszych części rozprawy, np. używanie różnych nazw i oznaczeń „indeksu DICE”.

W podrozdziale 2.4 Autor opisuje algorytmy postępowania przy dopasowaniu obrazów. Autor przedstawia schematy dopasowania sztywnego; dopasowania sztywnego wraz z procesem przetwarzania wstępnego oraz dopasowania elastycznego. W dalszej kolejności prezentowany jest opis (głównie z użyciem schematów blokowych) algorytmu deformacji z użyciem FEM oraz rekonstrukcji obrazu. Podobnie jak w omawianych wcześniej elementach pracy, opis ten jest napisany w sposób trudny do zrozumienia i jednoznacznej oceny. Z dalszej treści rozprawy można domniemywać, że są to algorytmy zaproponowane przez Autora w ramach realizacji celu rozprawy. Jest to kolejny znaczący mankament pracy. Autor powinien udokumentować swoją

pracę w sposób jednoznaczny, nie pozostawiając czytelnikowi jakichkolwiek wątpliwości, co jest przedmiotem prowadzonych badań oraz ich rezultatem i w jaki sposób zostały te badania przeprowadzone.

W podrozdziale 2.5 Autor opisuje podstawkę wykonaną na potrzeby badań PET/CT gruczołu piersiowego. Zgodnie z opisem we wcześniejszym podrozdziale badania te zostały wykonane w ramach realizacji projektu MILESTONE (STRATEGMED2/267398/4/NCBR/2015). Autor nie opisuje swojego wkładu w ten projekt, w tym w szczególności w wykonanie przedmiotowej podstawki. Poza tym opis podstawki w treści rozprawy przedstawiony jest pobieżnie, bez wchodzenia w szczegóły techniczne. W rozprawie powinny znaleźć się założenia przyjęte do zaprojektowania podstawki oraz jej rysunek techniczny, a przynajmniej najważniejsze jej wymiary, w szczególności wymiary otworów. Istotny ze względu na tematykę pracy byłby opis sposobu układania pacjenta. Na podstawie przedstawionego opisu jest możliwa ocena wkładu Autora w wykonanie opisywanej podstawki oraz jego poprawności.

W podrozdziale 2.6 Autor przedstawia opis wykonanego w ramach pracy fantomu piersi. Najistotniejszym zarzutem do tej części rozprawy jest nie wykazanie związku opisywanego w pracy fantomu z celem i tezami pracy. Niezależnie od powyższej uwagi, w moim przekonaniu opracowanie takiego fantomu to bardzo ciekawy oraz wartościowy element pracy i mógłby być on uznany za oryginalny wkład Autora w dyscyplinę. Niestety przedstawiony opis ponownie jest pobieżny. Brakuje szczegółowego przedstawienia podstawowych założeń przyjętych do projektowania fantomu oraz jego konkretnych parametrów, w tym wymiarów. Autor ogranicza się jedynie do lakonicznego opisu i trzech zdjęć przedstawiających kolejne generacje fantomu, co nie pozwala na merytoryczną ocenę ewolucji zaproponowanego rozwiązania fantomowego. Nawiązując do wcześniejszych uwag szczegółowy opis wykonania fantomu przedstawiający założenia, poszczególne etapy jego wykonywania oraz informację o parametrach fantomu powinien zostać przedstawiony w rozdziale dotyczącym realizacji celu pracy, a nie w opisie materiałów i metod.

W podrozdziale 2.7 Autor prezentuje (a w kontekście treści poprzednich podrozdziałów podsumowuje) wykonane w ramach rozprawy badania poprzez ich wypunktowanie. Jednak w treści rozprawy nigdzie nie zostało opisane szczegółowo, jak konkretnie wykonano te badania, jaki miały one cel, jakie przyjęto kryteria dopasowania i kryteria oceny osiąganych wyników. Autor w ramach badań przekształca obrazy kierując się niesprecyzowanymi kryteriami, dążąc do ich dopasowania bez uwzględnienia specyfiki obrazowanych obiektów.

W szczególności nie są opisane poszczególne etapy badań (dopasowań) oraz to jak Autor uzyskiwał wyniki przedstawione w rozdziale 3. Treść rozprawy nie pozwala również na ocenę, w jaki sposób zostały zaimplementowane przez Autora poszczególne metody dopasowania obrazów. Moim zdaniem rozprawa powinna zawierać przedstawienie i omówienie implementacji opracowanych algorytmów do środowisk programistycznych (m.in. MATLAB). W suplemencie powinny być również udostępnione opracowane kody, w celu oceny ich poprawności i jakości.

Reasumując, przedstawienie metod i materiałów uważam za niewłaściwe.

### Rozdział 3 Wyniki

W rozdziale tym Autor prezentuje wyniki dotyczące: dopasowania syntetycznych obrazów metodami elastycznymi (podrozdział 3.1); dopasowania obrazów medycznych metodami elastycznymi (podrozdział 3.2); badania dopasowania z wykorzystaniem różnych metod przetwarzania wstępnego (podrozdział 3.3); badania z wykorzystaniem metod elementów skończonych (podrozdział 3.4); elastycznego fantomu piersi (podrozdział 3.5).

Z powodu wyżej przedstawionych uwag, w szczególności braku poprawnego sformułowania celu prowadzonych badań, braku szczegółowego opisu przebiegu badań oraz braku przedstawienia kryteriów dopasowania i kryteriów oceny wyników, nie jest możliwa merytoryczna ocena prezentowanych wyników.

Podstawową uwagą dotyczącą treści tego rozdziału jest umieszczenie w nim obok wyników badań opisu zastosowanych metod badawczych oraz ich dyskusji. Zgodnie z tytułami rozdziałów dyskusja powinna być przeprowadzona w kolejnym rozdziale pracy, zaś metody opisane w poprzedzającym rozdziale. Niezrozumiałe jest również to, że Autor przedstawia wyniki w formie albo tabeli, albo wykresu. Biorąc pod uwagę niewielką liczbę wyników prezentowanych w rozprawie, wyniki powinny zostać przedstawione w obu tych formach.

Poniżej zamieszczam inne wybrane uwagi dotyczące treści tego rozdziału:

str. 57: *„Parametry dopasowania obrazów w przypadku zastosowania prawa Naviera-Lamego zostały wyznaczone w trakcie testów, w przypadku pozostałych metod wykorzystano standardowe parametry zaproponowane przez twórców.”*

W treści rozprawy nie ma jakiegokolwiek wzmianki o wspomnianych przez Autora testach, podobne jak o parametrach dopasowania. Z punktu widzenia oceny jakości przeprowadzonych badań oraz uzyskanych wyników jest to element kluczowy. Rozwijając dalej wątek parametrów opracowanych oraz używanych przez Autora metod należy stwierdzić, że ciekawym zagadnieniem byłaby analiza wpływu tych parametrów na uzyskiwane wyniki dopasowania. Podjęcie tego zagadnienia wraz z przedstawieniem oryginalnej udokumentowanej metody dopasowania obrazów miałyby znaczący walor badawczy w aspekcie tematyki pracy.

str. 57: Na podstawie oceny wizualnej (bez podania jej kryteriów oraz sposobu realizacji) Autor stwierdza: *„W drugim eksperymencie (rys. 3.5) zdecydowanym faworytem jest rozwiązanie z użyciem prawa Naviera-Lamego. Otrzymany kształt gwiazdy jest niemal identyczny z obrazem referencyjnym.”*

Podany wyżej opis jest jednym z wielu podobnych wniosków przedstawionych przez Autora. Trudno uznać taki sposób wnioskowania za poprawny i właściwy w opisie prac badawczych.

str. 58: *„W Tabelach 3.1 oraz 3.2 przedstawiono wyniki pomiarów wskaźnika DICE dla obu eksperymentów. Jak widać każdy algorytm polepszył wartość indeksu DICE w porównaniu do sytuacji przed dopasowaniem, przez co można stwierdzić, że otrzymany obraz za każdym razem był bardziej podobny do oczekiwanego rezultatu.”*

Stwierdzenie, że wskaźnik (indeks) DICE jest mierzony, jest nieprawdziwe. Nie do końca jest też zrozumiałe, czym dla Autora jest „oczekiwany rezultat”.

str. 58: *„Na podstawie pomiarów widać, że najbliższy oryginałowi był wynik algorytmu Naviera-Lamego. Obraz otrzymany po zadziałaniu tego algorytmu dopasowania w porównaniu do obrazu referencyjnego charakteryzował się największą wartością wskaźnika DICE. Drugi co do dokładności okazał algorytm MIRT, a ostatni z testowanej trójki był Tool of Kroon.”*

Powyżej zaprezentowane wnioski Autora w odniesieniu do wyników przedstawionych w tabeli (różnice na trzecim miejscu po przecinku) wydają się być nieuzasadnione. Szczególnie biorąc pod uwagę fakt, że Autor w swojej pracy nie optymalizował parametrów poszczególnych algorytmów i nie przedstawił konkretnych kryteriów oceny wyników.

str. 61: *„Wyniki wykazują, że lepsze dopasowanie niż w porównaniu do sytuacji przed dopasowaniem można dostać dla metod MIRT oraz Navier-Lamego. W przypadku metody Tool Of Kroon proces dopasowania pogorszył dopasowanie bardziej niż przed próbą dopasowania obrazów. Może to być spowodowane wartością parametrów działania tego algorytmu.”*

oraz

str. 67: *„Najlepsze efekty można zaobserwować dla prawa Naviera-Lamego oraz MIRT. Analizując współczynniki dopasowania obrazów SSD 3.14, MI 3.15 oraz indeks DICE 3.16 można zauważyć*



*poprawę dopasowania względem wartości początkowych zwłaszcza przy metodzie MIRT oraz zastosowaniu prawa Naviera-Lamego. W przypadku metody Tool of Kroon przy zastosowaniu domyślnych ustawień pojawiały się problemy z poprawnym dopasowaniem obrazu.”*

Pomijając poziom stylistyczny i językowy przedstawionych wyżej opisów należy zauważyć, że Autor mając świadomość istotności doboru parametrów algorytmów, celowo pomija zagadnienie oceny wpływu tych parametrów na działanie poszczególnych metod, a tym samym na wyniki prezentowane w pracy.

str. 71: Tabela 3.3 prezentuje wyniki dla 9 analizowanych przypadków, w kolejnych tabelach tego rozdziału wyniki przedstawione zostały dla 10 przypadków, co jest zgodne z opisem w tekście nad tabelą: *„Do testów wykorzystano badania 10 pacjentek (...)”*.

str. 71: *„Przedstawione metody zostały zastosowane do przetworzenia zarejestrowanego obrazu, tak, aby nowe obrazy odpowiadały obrazowi referencyjnemu.”*

Autor (nie tylko w tym miejscu) nie przedstawia kryteriów dopasowania i ich celu.

str. 79 oraz 81: Tabela 3.6 oraz tabela 3.7 prezentuje wyniki dla 5 analizowanych przypadków, podczas gdy w treści pracy Autor pisze: *„Na tym etapie prac wykonano badanie z użyciem rezonansu magnetycznego dla siedmiu osób płci męskiej”*.

str. 83: *„Wyniki nakładania obrazów piersi wykonane w poprzednim badaniu oraz wstępne badania przy różnym ułożeniu pacjentek wskazały na konieczność zastosowania innych metod niż dotychczas badane.”*

Powyższe sformułowanie nie znajduje odzwierciedlenia w treści rozprawy.

str. 91: *„Zbudowany fantom piersi został poddany akwizycji za pomocą aparatów Siemens mCT Biograph w celu uzyskania obrazów CT oraz Siemens Avanto w celu uzyskania obrazu sekwencji MRI. (...) Na rysunkach 3.30a oraz 3.30b przedstawiono uzyskane obrazy w technologii rezonansu magnetycznego. Na obrazach zarejestrowano dwie sekwencje T1 i T2. Jest to cenna informacja, ponieważ rejestracja obrazów tą metodą jest możliwa tylko dla fantomów dedykowanych do aparatów MRI.”*

Trudno uznać za cenną informację fakt samego zobrazowania fantomu. To stwierdzenie powinno być poparte analizą parametrów uzyskanych obrazów i wykazaniem ich przydatności w pracach badawczych.

str. 91: *„W trakcie badań znacznik zajmował tę samą pozycję, natomiast w trakcie zmiany pozycji odległość pomiędzy znacznikiem a podstawa fantomu piersi uległa zmianie.”*

Jakie ma to znaczenie z punktu widzenia tematu i celu pracy?

#### Rozdział 4 Dyskusja

W rozdziale tym Autor prezentuje dyskusję wyników dotyczących: dopasowania obrazów syntetycznych (podrozdział 4.1); badania z wykorzystaniem metod elastycznych (podrozdział 4.2); badania dopasowania z wykorzystaniem różnych metod przetwarzania wstępnego (podrozdział 4.3); badania z wykorzystaniem metod elementów skończonych (podrozdział 4.4); elastycznego fantomu piersi (podrozdział 4.5).

Jak wspominałem wyżej, w rozdziale 3 dotyczącym wyników Autor przeprowadza ich analizę i równolegle dyskusję. Treść rozdziału 4 jest w dużej mierze powtórzeniem dyskusji i wniosków dotyczących prezentowanych wyników. W szczególności Autor w dyskusji nie wykazuje jednoznacznie wyższości opracowanego w ramach pracy algorytmu oraz nie odnosi się w sposób wystarczający do stanu wiedzy i nie ocenia uzyskanych wyników krytycznie w tym kontekście, tym samym nie wykazuje oryginalnego wkładu prezentowanych w rozprawie wyników badań w dyscyplinę inżynieria biomedyczna.

Dodatkowo chciałbym zwrócić uwagę na podrozdział 4.5 związany z dyskusją badań dotyczących elastycznego fantomu piersi. Podrozdział ten zawiera opis fantomu oraz elementy sposobu jego wykonania. Uwagę zwraca szczególnie opis dotyczący badań prowadzonych podczas opracowywania tego fantomu:

*„Badania były prowadzone również z zastosowaniem innych materiałów pełniących rolę wypełnienia fantomu. Równocześnie sprawdzono czy zastosowanie agarozy w różnych stężeniach pozwala na symulacje deformacji. W przypadku niskiego stężenia agarozy fantom był elastyczny, ale nie utrzymywał kształtu. W przypadku dużego stężenia agarozy struktura zachowywała kształt, jednak pod wpływem dużego odkształcenia dochodziło do rozerwania struktury. W przypadku zastosowanego w pracy materiału duże deformacje nie niszczyły fantomu i zachowywał się realistycznie pozwalając na badania deformacji wewnętrznych struktur w różnych położeniach fantomu.”*

Jak napisałem wcześniej część pracy dotycząca opracowania fantomu gruczołu piersiowego w moim przekonaniu jest bardzo ciekawym i wartościowym elementem rozprawy i mógłby być on uznany za istotny wkład Autora w dyscyplinę. W tym kontekście zupełnie niezrozumiały dla mnie jest fakt, pominięcia opisu przeprowadzonych przez autora badań nad tym fantomem, m.in cytowanych wyżej badań dotyczących doboru materiału do wykonania fantomu, w szczególności zastosowania agarozy.

#### Rozdział 5 Podsumowanie

W podsumowaniu Autor przedstawia ponownie cel pracy stwierdzając jednoznacznie, że:

*„Cel pracy został osiągnięty, jednak by dobrze zoptymalizować metodę działania należało rozważyć kilka scenariuszy w czasie badań, i wykazano skuteczność wybranych metod dla różnych danych medycznych.”*

Na podstawie analizy treści przedstawionej do oceny rozprawy nie mogę zgodzić się z takim stwierdzeniem, gdyż treść rozprawy nie dokumentuje „zoptymalizowania metody” i rozważenia „kilku scenariuszy w czasie badań”. Podobnie nie zgadzam się, że w rozprawie „wykazano skuteczność wybranych metod dla różnych danych medycznych”. W świetle przedstawionych wyżej uwag za nieudokumentowany uważam również wniosek „Implementacja prawa Naviera-Lamego pozwoliła na uzyskanie bardzo dobrych wyników, często nawet lepszych niż wyniki uzyskane przez ogólnodostępne programy do dopasowania obrazów jak MIRT czy Tool of Kroon.”

Zarówno w dyskusji, jak i w podsumowaniu rozprawy, nie przedstawiono konkretnych informacji dotyczących możliwości praktycznego zastosowania uzyskanych wyników prezentowanych badań oraz ewentualnych dalszych możliwości rozwoju proponowanych metod i fantomu.

Autor kończy podsumowanie, a zarazem całą rozprawę zdaniem:

*„Wszystkie założenia tej pracy zostały spełnione, na co dowodem jest szereg wyników i zaprezentowanych efektów.”*

Biorąc pod uwagę brak sformułowania w rozprawie konkretnych i jednoznacznych założeń oraz jakość prezentowanych wyników i efektów pracy, zdanie to uważam za bezpodstawne.

W mojej opinii treść rozprawy nie przedstawia w sposób właściwy oryginalnego rozwiązania problemu naukowego oraz nie potwierdza posiadania przez Autora umiejętności w zakresie planowania, realizowania i dokumentowania prac naukowych.

#### **Ocena zastosowanego w rozprawie piśmiennictwa.**

Autor powołuje się na 75 pozycji literaturowych. W większości przypadków są one dobrane prawidłowo do poruszanych zagadnień. Pewną wątpliwość może budzić niewielka, jak na rozprawę doktorską o tej tematyce, liczba pozycji literaturowych, jednak w odniesieniu do treści ocenianej rozprawy można ją uznać za dostateczną. Tym samym zastosowanie piśmiennictwa w rozprawie oceniam pozytywnie.

### **Uwagi edytorskie i redakcyjne (wybrane).**

Niezrozumiały jest dla mnie podział numeracji stron. Numeracja z zastosowaniem rzymskiego systemu zapisywania liczb jest przerwana przez strony numerowane liczbami arabskimi. Poza tym strona numerowana jako VI pojawia się w pracy dwukrotnie.

Streszczenia i słowa kluczowe, dość nietypowo dla prac naukowych, zostały umieszczone na końcu rozprawy.

W zapisie ułamków niepoprawnie używany jest separator dziesiętny w postaci kropki.

Autor używa wyrazu „ilość” zamiast „liczba” dla rzeczowników policzalnych.

Autor w zapisie bibliografii stosuje numeryczny system odwołań. W systemie takim ogólnie przyjętą regułą jest wpisywanie odnośników literaturowych w tekście w porządku rosnącym. W przedmiotowej rozprawie Autor nie stosuje się do tej zasady, porządkując spis pozycji literaturowych w sposób alfabetyczny. W wyniku tego zabiegu odnośniki pojawiają się w zupełnie losowej kolejności, nawet gdy są podawane obok siebie.

Materiał ilustracyjny zawarty w rozprawie jest mało czytelny i trudny do interpretacji. W pracy Autor powinien poświęcić więcej uwagi formie prezentowanych rysunków, szczególnie gdy są one obrazami do oceny wizualnej. Dodatkowo wykresy przedstawiane w tekście są przygotowane w sposób utrudniający ich interpretację, w szczególności: dane na osiach są prezentowane małą czcionką; liczby na osiach nie są przedstawiane w notacji naukowej; osie i linie siatki są praktycznie niewidoczne na wydruku.

W wielu przypadkach odwołanie w tekście pracy do rysunku ogranicza się wyłącznie do podania jego numeru bez słowa *Rysunek*, np.

*„Jednak najlepszym materiałem okazało się PVA-Slime czyli związek alkoholu poliwinylowego z tetraboranem sodu 2.16.”*

*„Obrazy te zostały wygenerowane w kolorach w skali szarości i przedstawiały figury geometryczne 3.1.”*

Autor w nagłówkach tabel używa wyrazu „tablica”, zaś w tekście rozprawy wyrazu „tabela”.

### **Konkluzja końcowa.**

Na podstawie sformowanych w treści niniejszej recenzji uwag oraz ocen poszczególnych elementów rozprawy stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Pawła Bzowskiego zatytułowana *„Metody elastycznego dopasowania obrazów medycznych w zastosowaniach do różnych technik obrazowania”*, nie spełnia wymagań stawianych rozprawom doktorskim w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742).

W szczególności treści rozprawy: nie przedstawia w sposób jednoznaczny oryginalnego rozwiązania problemu naukowego, nie daje podstaw do pozytywnej oceny ogólnej wiedzy teoretycznej Autora z zakresu inżynierii biomedycznej oraz nie wykazuje, że Autor posiada umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Na tej podstawie wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna Politechniki Śląskiej o nieprzyjęcie przedmiotowej rozprawy i niedopuszczenie jej do publicznej obrony.

Warszawa, 13 września 2023 r.

  
dr hab. inż. Piotr Tulik

