

Recenzja pracy doktorskiej

Tytuł rozprawy: „Metoda wyznaczania przemieszczeń i odkształceń lewej komory serca, z użyciem danych echokardiograficznych poprzez elastyczne dopasowanie obrazów, wzbogacone o informację z segmentacji”

Autor rozprawy: mgr inż. Aleksandra Wilczewska

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Jakub Żmigrodzki

Promotor pomocniczy: dr inż. Szymon Cygan

Dziedzina: nauki inżyniersko-techniczne

Dyscyplina: inżynieria biomedyczna

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Aleksandry Wilczewskiej, która została opracowana na zlecenie wyrażone w piśmie z dnia 22 marca 2024r. Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna w Politechnice Warszawskiej, prof. dr. hab. inż. Tomasza Markiewicza. Rozprawa napisana została w języku polskim.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska podejmuje nowatorski temat badań nad opracowaniem i implementacją metody wyznaczania przemieszczeń i odkształceń lewej komory serca, z użyciem danych echokardiograficznych poprzez elastyczne dopasowanie obrazów, wzbogacone o informację z ich segmentacji. W ramach rozprawy Doktorantka zrealizowała prace badawcze o charakterze obliczeniowym, ukierunkowane na rozwiązanie powyższego problemu. Rozprawa ma charakter naukowo-badawczy i obejmuje wyraźnie wydzieloną część teoretyczną oraz badawczą. W teoretycznej części rozprawy Doktorantka opisała metody wyznaczania przemieszczeń i odkształceń mięśnia sercowego z wykorzystaniem techniki śledzenia plamek w obrazach USG w kontekście badań echokardiograficznych wraz z analizą możliwości wykorzystania informacji o konturze w elastycznym dopasowaniu obrazów. W badawczej części rozprawy Doktorantka przedstawiła nowatorską wersję opracowanego algorytmu elastycznego dopasowania obrazów zaimplementowanego w środowisku MATLAB, uwzględniając dodatkowo informację z segmentacji obrazów, przeanalizowała i dobrała odpowiednie kombinacje zakresów wartości współczynnika wagowego kary niedopasowania masek k_m oraz wagi kary gładkości ω_s , wchodzących w skład funkcji kosztu decydującej o liczbie iteracji algorytmu oraz dokonała weryfikacji poprawności działania opracowanego algorytmu elastycznego dopasowania obrazów echokardiograficznych dla zestawów danych wejściowych zróżnicowanych pod względem jakości i dokładności, co pozwoliło jej na realizację założeń i celu pracy.

Tematyka rozprawy jest istotna i aktualna pod kątem badawczym i aplikacyjnym. Rozprawa napisana jest w języku polskim, zawiera łącznie 147 stron i składa się z siedmiu rozdziałów wraz ze stroną tytułową, podziękowaniami, spisem treści, streszczeniami w języku polskim i angielskim, bibliografią oraz dodatkiem prezentującym szczegółowe dane liczbowe związane z walidacją opracowanego przez Doktorantkę algorytmu.

Rozdział 1 (Wstęp) obejmuje 25 stron rozprawy i zawiera krótkie wprowadzenie do badań echokardiograficznych i metody pozwalającej na wyznaczanie przemieszczeń i odkształceń mięśnia sercowego z wykorzystaniem echokardiografii śledzenia plamek (ang. *Speckle Tracking Echocardiography – STE*), opis celu i zakresu pracy, opis podstaw fizycznych obrazowania ultradźwiękowego oraz sposobu prowadzenia badań echokardiograficznych i metod regionalnej oceny funkcji mięśnia sercowego, przedstawienie sposobu wyznaczania odkształceń, przemieszczeń i segmentacji obrazów oraz metody ich elastycznego dopasowania w technice STE, jak również analizę możliwości wykorzystania informacji o konturze w elastycznym dopasowaniu obrazów. Rozdział ten opracowany został na podstawie obszernej analizy literaturowej.

W **Rozdziale 2 (Proponowany algorytm i jego implementacja)** składającym się z 10 stron rozprawy, Doktorantka przedstawiła nowatorską wersję opracowanego algorytmu elastycznego dopasowania obrazów zaimplementowanego w środowisku MATLAB.

Kolejny 19-stronicowy **Rozdział 3 (Walidacja opracowanej metody)** zawiera opis danych walidacyjnych wykorzystanych przez Doktorantkę do oceny sposobu i dokładności działania opracowanego algorytmu oraz opis zastosowanej metody i miary oceny dokładności estymacji przemieszczeń i odkształceń mięśnia sercowego.

Rozdział 4 (Dobór wartości hiperparametrów algorytmu) liczy 13 stron i dotyczy analizy doboru wartości hiperparametrów opracowanego i zaimplementowanego przez Doktorantkę algorytmu. Rozdział ten jest istotny ze względu na praktyczne wykorzystanie algorytmu, który powinien dawać możliwość pracy z różnymi zestawami danych w zależności od jakości obrazów USG oraz sposobu ich przetwarzania. Badania te pozwoliły Doktorantce na szczegółową analizę i optymalny dobór odpowiednich kombinacji zakresów wartości współczynnika wagowego kary niedopasowania masek k_m oraz wagi kary gładkości ω_s .

W najbardziej obszernym i istotnym pod kątem badawczym **Rozdziale 5 (Wyniki walidacji algorytmu)** liczącym 40 stron, Doktorantka dokonała weryfikacji poprawności działania opracowanego algorytmu elastycznego dopasowania obrazów echokardiograficznych z wykorzystaniem w funkcji kary dodatkowo danych z segmentacji, dla zestawów danych wejściowych zróżnicowanych pod względem jakości i dokładności. Badanie zmienności optymalnych wartości wag funkcji kar wykazało, że ich zakres pozwalający na zminimalizowanie wartości sumy średnich błędów wyznaczania przemieszczeń jest szeroki i niezmienny w przypadku zestawów danych wejściowych, których akwizycja przebiegała w podobnych warunkach; w takim przypadku wystarczająca jest jednorazowa kalibracja. W przypadku danych pochodzących ze zróżnicowanych zestawów, sumy średnich błędów wyznaczania przemieszczeń zależą od wartości wag funkcji kar i wskazana jest wówczas kalibracja wartości wagowych.

Rozdział 6 (Podsumowanie) jest 3-stronicowym podsumowaniem przeprowadzonych badań, w którym Doktorantka w syntetyczny sposób opisała przeprowadzone badania, uzyskane rezultaty i osiągnięcia oraz wykazała udowodnienie postawionej tezy.

Rozprawę uzupełnia 7-stronicowa **Bibliografia (Rozdział 7)**, która liczy 93 pozycje. Literatura przedmiotu cytowana przez Doktorantkę jest prawidłowo dobrana i w znakomitej większości są to pozycje anglojęzyczne.

Układ rozprawy jest logiczny i nie budzi zastrzeżeń. Treści rozprawy zostały podzielone na rozdziały w sposób właściwy, a ich zawartość i zakres zostały przedstawione przez Doktorantkę w sposób przejrzysty i wyczerpujący. Zagadnienia związane z wprowadzeniem do tematu rozprawy, przedstawieniem przyjętych założeń i oczekiwań, celu i metodyki pracy zostały zawarte w jednym rozdziale rozprawy liczącym 25 stron (tj. 17 % całej rozprawy). Zagadnienia związane z badaniami zrealizowanymi w rozprawie przez Doktorantkę obejmującymi opracowanie i implementację algorytmu, walidację opracowanej metody, dobór wartości hiperparametrów algorytmu, wyniki walidacji algorytmu i ich

analizę oraz podsumowanie zawarte zostały w pięciu rozdziałach rozprawy i w dodatku do rozprawy (2, 3, 4, 5, 6, Dodatek A) liczących łącznie 85 stron (tj. ok. 58 % całej rozprawy).

Rozprawa dotyczy badań z zakresu aktualnych i najnowszych osiągnięć nauki w realizowanym przez Doktorantkę obszarze tematycznym i świadczy o szerokiej znajomości zagadnień literatury przedmiotu w interdyscyplinarnym zakresie zaawansowanych metod przetwarzania obrazów ultradźwiękowych do zastosowań w diagnostyce medycznej stanu i zmian chorobowych mięśnia sercowego, w połączeniu z obszarami informatyki, akustyki, mechaniki i fizyki, co tematycznie zawiera się w dyscyplinie inżynieria biomedyczna.

Wyznaczanie odkształceń i przemieszczeń mięśnia sercowego z wykorzystaniem metody śledzenia plamek w obrazach echokardiograficznych uzyskiwanych za pomocą ultrasonografów szeroko wykorzystywanych w placówkach medycznych i bezpiecznych dla zdrowia pacjentów jest rozwiązaniem takim i możliwym do zaimplementowania na platformach komputerowych bez konieczności konstruowania dedykowanych do tego celu urządzeń. Zwiększanie dokładności wyznaczania globalnych wartości tych odkształceń i przemieszczeń może przyczynić się do zwiększenia prawdopodobieństwa postawienia prawidłowej diagnozy w licznych i różnorodnych schorzeniach sercowo-naczyniowych, jak również podczas monitorowania stanu pacjentów po przeszczepie serca.

2. Oryginalne osiągnięcia rozprawy

Szybki rozwój technologiczny skutkuje dynamicznym postępowaniem w rozwoju nowych, zaawansowanych obliczeniowo metod diagnostycznych, często z wykorzystaniem sieci neuronowych i uczenia maszynowego lub sztucznej inteligencji, które znacząco zwiększają prawdopodobieństwo szczegółowego rozpoznania zmiany chorobowej i skutecznego dopasowania odpowiedniej metody leczenia przed wystąpieniem zagrożenia powikłań, czy utraty życia. W szczególności rozwijane są ultradźwiękowe medyczne urządzenia diagnostyczne umożliwiające nieinwazyjne i bezpieczne obrazowanie wnętrza ciała ludzkiego *in vivo*. W produkowanych aparatach USG z roku na rok pojawiają się nowe opcje, metody i algorytmy umożliwiające zwiększenie jakości i rozdzielczości obrazów uzyskiwanych za pomocą impulsów ultradźwiękowych odbitych i rozproszonych na niejednorodnościach tkankowych. Jedną z rozwijanych metod obrazowania jest ultradźwiękowa wizualizacja ruchu, odkształceń i przemieszczeń struktur mięśnia sercowego. Tzw. echokardiografia 2D jest powszechnie stosowaną metodą wykorzystywaną w kardiologii i pozwalającą na ocenę funkcjonalną serca *in vivo*. Wspomagające w tym zakresie są nowatorskie metody obrazowania 3D z wykorzystaniem ultradźwiękowej sondy matrycowej, udoskonalane nieustannie ultradźwiękowe techniki dopplerowskie umożliwiające wizualizację i wyznaczenie prędkości i natężenia przepływu krwi w strukturach sercowo-naczyniowych, czy tzw. Doppler tkankowy (ang. *Tissue Doppler Imaging – TDI*) pozwalający na wizualizację prędkości struktur tkankowych w obrębie mięśnia sercowego oraz w rogach pierścienia mitralnego i trójdzielnego. Niemniej istotny jest rozwój metod i algorytmów obliczeniowych w obszarze zagadnień podjętych przez Doktorantkę, związanych z wyznaczaniem przemieszczeń i odkształceń mięśnia sercowego w sposób zautomatyzowany za pomocą techniki śledzenia plamek w obrazach USG, które w takim zastosowaniu znane jest jako STE (*Speckle Tracking Echocardiography*). Należy dodać, że metoda śledzenia wzorców plamek (ang. *Speckle Patterns Tracking – SPT*) ultradźwiękowego obrazu przepływu krwi jest wykorzystywana m.in. w metodzie AIDC (*Angle Independent Color Doppler*), która pozwala na uniezależnienie ultradźwiękowego obrazowania przepływu krwi od kąta padania fali. Badania podjęte przez Doktorantkę nad zwiększeniem dokładności wyznaczania przemieszczeń i odkształceń mięśnia lewej komory serca na podstawie segmentacji obrazów USG wpisują się więc w obecny trend rozwojowy, tym bardziej, że uzyskane przez nią wyniki badań są obiecujące i dodatkowo umożliwiają skrócenie czasu obliczeń.

Za cel rozprawy Autorka przyjęła opracowanie i weryfikację nowej metody wyznaczania przemieszczeń i odkształceń mięśnia lewej komory serca. Na potrzeby realizacji wyznaczonego celu

rozprawy Doktorantka sformułowała tezę w postaci założenia, że włączenie informacji pochodzącej z segmentacji analizowanych obrazów echokardiograficznych do obecnie stosowanego algorytmu elastycznego dopasowania obrazów powinno zwiększyć dokładność wyznaczania przemieszczeń i odkształceń mięśnia sercowego.

W efekcie realizacji celu pracy Doktorantka wykazała, że:

- zastosowanie w funkcji kosztu (decydującej o liczbie iteracji elastycznego dopasowania obrazów) dodatkowego komponentu w postaci kary niedopasowania masek pozwala na uzyskanie wyników lepszych lub porównywalnych do wyników uzyskanych przy zastosowaniu metody referencyjnej ze standardowo wykorzystywaną karą gładkości. Wniosek taki dotyczy także badań z użyciem danych z obrazowania fantomu lewej komory serca oraz danych semi-syntetycznych, w których wykorzystano maski uzyskane z segmentacji obrazów metodą aktywnego konturu;
- dokładność masek generowanych za pomocą powszechnie stosowanych metod segmentacji powinna być wystarczająca do zastosowania opracowanego algorytmu i uzyskania poprawy dokładności wyznaczania odkształceń i przemieszczeń mięśnia sercowego;
- w przypadku danych klinicznych, zaproponowany algorytm poprawia dokładność elastycznego dopasowania obrazów w porównaniu z wersją algorytmu nie wykorzystującego kary niedopasowania masek;
- czas wykonywania obliczeń realizowanych przez opracowany algorytm wykorzystujący dodatkowo karę niedopasowania masek jest krótszy o około 30 % – 39 % niż w przypadku standardowego algorytmu tylko z karą gładkości. Rozszerza to możliwości zastosowania opracowanego algorytmu elastycznego dopasowania obrazów w systemach mobilnych, dysponujących ograniczoną mocą obliczeniową.

Doktorantka dążyła do udowodnienia postawionej tezy poprzez realizację zadań naukowo-badawczych obejmujących opracowanie i implementację nowej wersji algorytmu elastycznego dopasowania dwuwymiarowych obrazów echokardiograficznych z wykorzystaniem w funkcji kary dodatkowo danych z segmentacji, dla zestawów danych wejściowych zróżnicowanych pod względem jakości i dokładności, analizę i dobór wartości wag w funkcji kosztu, kompleksową walidację opracowanej metody i algorytmu. Pozwoliło to Doktorantce na dobór zakresu wartości hiperparametrów umożliwiających zoptymalizowanie i zautomatyzowanie działania algorytmu dla różnych zestawów danych wejściowych. W rezultacie Doktorantka zrealizowała cel rozprawy oraz udowodniła postawioną tezę wykazując, że włączenie informacji pochodzącej z segmentacji analizowanych obrazów echokardiograficznych do obecnie stosowanego algorytmu elastycznego dopasowania obrazów pozwala na zwiększenie dokładności wyznaczenia przemieszczeń i odkształceń mięśnia sercowego.

Według danych zawartych w bazie *Web of Science (WoS)* na dzień 20.05.2024r, Doktorantka jest współautorką 3 publikacji, w tym 2 artykułów w czasopismach naukowych z listy JCR (*Ultrasonic Imaging: IF = 2.3, 70 pkt. na liście czasopism MNiSW* oraz *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control: IF = 3.6, 100 pkt. na liście czasopism MNiSW*) oraz 1 referatu z konferencji międzynarodowej (15th International Conference on Global Research and Education (Inter-Academia)), z której wygłoszone referaty zostały opublikowane w postaci rozdziałów w książce pt. „*Recent Global Research and Education*” wydanej przez Springera w ramach serii *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Według bazy *Web of Science* na dzień 20.05.2024, publikacje te **cytowane** były **4-krotnie** z wyłączeniem autocytowań, a **indeks Hirsha** Doktorantki **wynosi 2**. Wszystkie publikacje mgr. inż. Aleksandry Wilczewskiej są pracami współautorskimi, co w obszarze prac eksperymentalno-badawczych wykorzystujących skomplikowane techniki pomiarowe i obliczeniowe wskazuje na umiejętność twórczej pracy w zespole. Taki dorobek publikacyjny Doktorantki wykazuje, że zdobyła ona wiedzę w zakresie tematyki swoich badań oraz że Jej osiągnięcia zostały zweryfikowane w środowisku naukowym.

Za najważniejsze osiągnięcia i oryginalny dorobek Doktorantki uznaję:

1. Opracowanie rozbudowanej wersji kompletnego algorytmu dopasowania obrazów echokardiograficznych umożliwiającej zwiększenie dokładności wyznaczania przemieszczeń i odkształceń mięśnia sercowego dzięki dodatkowym danym z segmentacji wykorzystanym w funkcji kosztu.
2. Przeprowadzenie kompleksowej oceny sposobu i dokładności działania opracowanego algorytmu z wykorzystaniem różnych zestawów danych, od syntetycznych (z możliwością porównania z dokładnym wzorcem) do klinicznych, w których segmentacja obrazów przeprowadzona została za pomocą konwolucyjnej sieci neuronowej na podstawie masek referencyjnych wygenerowanych przez doświadczonych lekarzy diagnostów.

Osiągnięcia Doktorantki stanowią oryginalny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria biomedyczna w kontekście możliwości zwiększenia dokładności wyznaczania przemieszczeń i odkształceń struktur serca na podstawie danych echokardiograficznych.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

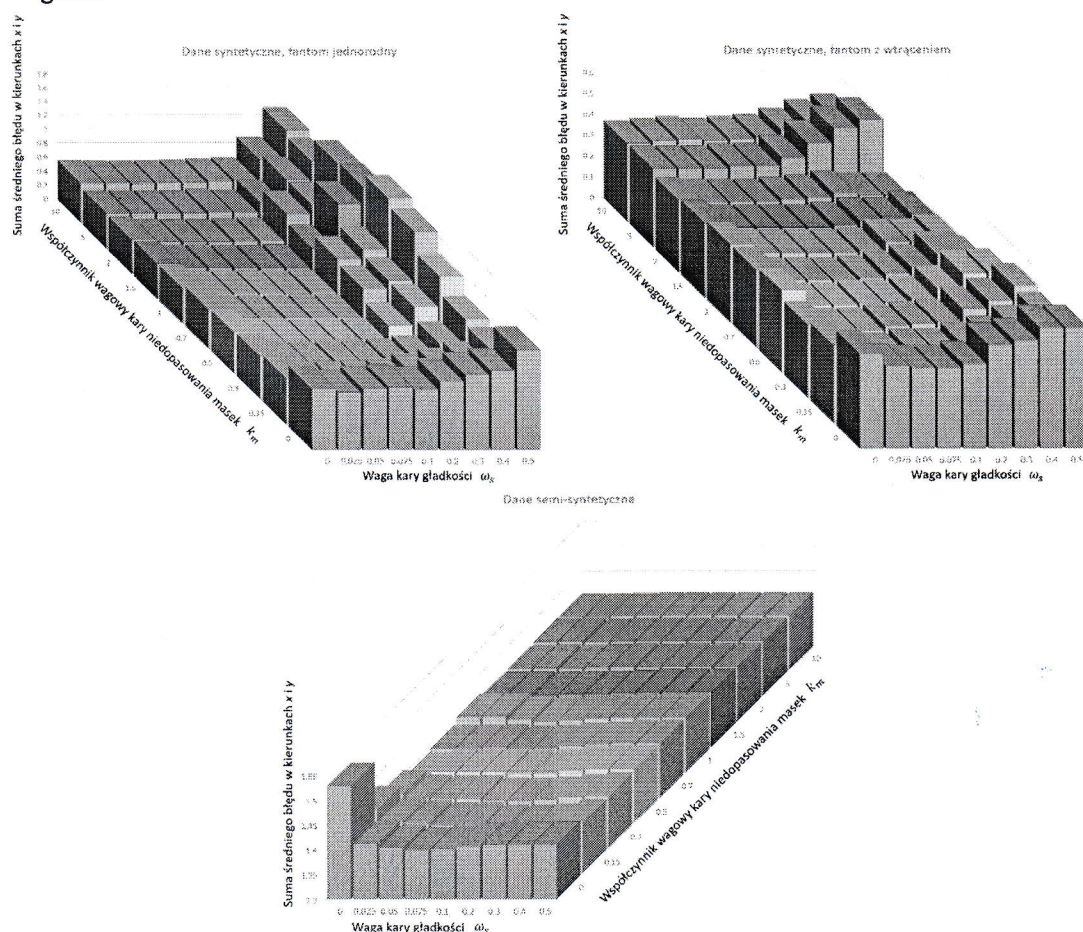
Po wnikliwej lekturze rozprawy nasuwają mi się następujące uwagi krytyczne:

1. Trochę rażąco wydaje się przyjęcie w pracy spolszczonego określenia „spekle” oznaczającego charakterystyczne plamki w obrazie ultrasonograficznym. Uważam, że należy posługiwać się słowem „plamki”. Przyjęcie określenia tzw. „spekli” prowadzi później do jeszcze bardziej niefortunnych sformułowań jak np. w tytule rozdziału 1.2.1 – „Struktura speklowa”. Należałoby tu użyć sformułowania ziarnista struktura obrazu USG z wyjaśnieniem, że ziarna tworzą plamki będące wynikiem interferencji odbitych i rozproszonych w tkance impulsów ultradźwiękowych; wyjaśnienie takie zresztą zostało zamieszczone przez Doktorantkę w tymże rozdziale.
2. Tabela 10 – zamiast oznaczenia wartości współczynnika wagowego kary k_m niedopasowania masek, który występuje w Tabeli 9, wpisano tu oznaczenie niezdefiniowanej wagi ω_k .
3. Mylący dla czytelnika jest brak ujednolicenia jednostek miary błędów wartości przemieszczeń, które np. w rozdz. 4 podawane są w milimetrach, a w rozdz. 5 – w metrach.
4. W celu łatwiejszej analizy porównawczej, średni czas wykonania algorytmu elastycznego dopasowania obrazów w Tabeli 15 powinien zostać przeliczony na minuty.
5. Rozdział 4 - w celu łatwiejszej interpretacji i analizy porównawczej, wartości średnich sumy błędów średnich w kierunkach x i y powinny być przedstawione w jakiejś postaci wykresów pseudo-trójwymiarowych (zob. rys. poniżej opracowany w Excelu), szczególnie ze względu na często niewielkie zróżnicowanie ich wartości, chociaż należy zaznaczyć, że zakolorowanie przez Doktorantkę pól tabeli w różnych intensywnościach barwy koloru niebieskiego jest bardzo pomocne.
6. W Rozdziale 4 brakuje objaśnienia w jaki sposób wyznaczane były średnie wartości powyższych błędów oraz średnie ich sumy.

Uwagi dyskusyjne:

Na podstawie tabel zamieszczonych w Rozdziale 4 oraz wykresów pudełkowych przedstawionych w Rozdziale 5 widać, że często wprowadzenie współczynnika wagowego kary niedopasowania masek ($k_m > 0$) nie zmienia błędów wyznaczania przemieszczeń i odkształceń albo zmniejsza je w niewielki sposób, szczególnie jeśli weźmiemy pod uwagę zakresy zmian wartości tych błędów. W związku z tym rodzi się pytanie, jak bardzo uzyskana w ten sposób poprawa dokładności elastycznego dopasowania obrazów i wynikające z niej zwiększanie dokładności wyznaczania globalnych wartości odkształceń i przemieszczeń w strukturach mięśnia sercowego jest istotne w odniesieniu do diagnozowania zmian chorobowych (i jakiego rodzaju

patologii) w porównaniu z algorytmami bez takiej poprawy. Jaka dokładność jest tutaj wymagana?



Proszę o przeanalizowanie tego problemu podczas obrony rozprawy doktorskiej, biorąc pod uwagę jakość i rozdzielczość obrazów USG osiąganą w produkowanych i użytkowanych obecnie aparatach. Jaka jest możliwa do osiągnięcia rozdzielczość rozpoznawania struktur i granic tkankowych w obrazach USG dla częstotliwości wykorzystywanych w echokardiografii? Należy wziąć pod uwagę, że rozdzielczość ta pogarsza się w zależności od wielu czynników i zjawisk (np. kąt padania fali, zasięg, tłumienie, różnica impedancji akustycznych, zniekształcenie obrazu, itd.). Należałoby więc spróbować przeanalizować ten problem w kontekście rozdzielczości wzdłużnej, poprzecznej, kontrastowej, czasowej, wielkości plamek obrazu, itp., bo może się okazać, że w wielu przypadkach rozdzielczość obrazu USG jest istotnym ograniczeniem w odniesieniu do możliwości poprawy rozdzielczości wyznaczania przemieszczeń i odkształceń w strukturze serca.

Przedstawione przeze mnie uwagi nie umniejszają mojej jednoznacznie pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej, stanowią natomiast wskazówki do udoskonalenia sposobu przedstawienia przez Doktorantkę wyników badań oraz podstawę do ciekawej i kreatywnej dyskusji naukowej.

4. Ocena redakcyjnej strony rozprawy

Rozprawa jest napisana bardzo starannie. Opis podjętych przez Doktorantkę prac badawczych jest przejrzysty i zrozumiały; został opracowany z wykorzystaniem języka technicznego adekwatnego do opisywanych zagadnień.

Redakcja rozprawy jest właściwa, z logicznym podziałem treści poszczególnych rozdziałów, z czytelnymi ilustracjami dobrej jakości i rozdzielczości. Wyniki zostały przedstawione umiejętnie i

[Signature]

przekonująco, nie tylko w postaci tabel z wartościami ale również w sposób graficzny, umożliwiając ich analizę i porównanie.

Błędy, które znalazłem w tekście rozprawy są nieliczne i mają charakter drobnych błędów redakcyjnych:

1. str 6 - błędy wyznaczania przemieszczeń albo ich wartości są „mniejsze niż”, a nie, jak pisze Doktorantka - „niższe niż”; niższe mogą być poziomy (ang. *level*),
2. wzór 4 – brakuje objaśnienia w tekście dziedziny „ a ” odnoszącej się do skoku jednostkowego $\mu(a)$,
3. wzór 13 - brakuje objaśnienia w tekście zbioru D (pod znakiem sumy widnieje zapis, że „ $x, y \in D$ ”,
4. w całej pracy, w wielu miejscach większość zmiennych pisana jest tekstem prostym, a powinna być pisana kursywą, wg konwencji stosowanej w równaniach,
5. str 112 – brakuje „w” w zdaniu „... zaś jednej czwartej sekwencji ...”.

Przytoczone błędy nie powodują trudności w zrozumieniu zagadnień, czy też w interpretacji wyników i w kontekście wysokiej oceny całości redakcji pracy nie mają istotnego znaczenia.

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Mgr inż. Aleksandra Wilczewska w oryginalny sposób rozwiązała postawiony w rozprawie doktorskiej problem naukowy posługując się szeroką wiedzą, skomplikowanymi metodami obliczeniowymi, właściwie dobranymi narzędziami informatycznymi oraz stosując zaawansowane metody przetwarzania obrazów i odpowiednie techniki analityczne. Przedłożona do oceny rozprawa doktorska, sposób jej realizacji, uzyskane wyniki, przeprowadzone analizy i sformułowane na ich podstawie wnioski wykazują, że Doktorantka posiada wysokie umiejętności związane ze sposobem prowadzenia badań naukowych, jak również wiedzę na zaawansowanym poziomie o charakterze interdyscyplinarnym dla dziedziny nauk inżynierijno-technicznych oraz o charakterze szczegółowym, związanym z obszarem prowadzonych badań naukowych w dyscyplinie inżynieria biomedyczna. Postawiony w rozprawie problem naukowy został przez Doktorantkę szczegółowo rozpoznany, przeanalizowany i rozpracowany, co doprowadziło ją do opracowania nowej wersji algorytmu elastycznego dopasowania dwuwymiarowych obrazów echokardiograficznych cechującego się zwiększoną dokładnością i wydajnością wyznaczania przemieszczeń i odkształceń mięśnia sercowego, zgodnie z określonymi założeniami i celem rozprawy.

W konkluzji stwierdzam, że mgr inż. Aleksandra Wilczewska udowodniła postawioną tezę oraz wniosła nowatorski wkład w rozwój dyscypliny inżynieria biomedyczna.

Recenzowana rozprawa doktorska spełnia warunki określone w art. 187 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2023 poz. 742 z późn. zm.) w dziedzinie nauk inżynierijno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria biomedyczna. Wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

