

Łódź, dn. 26 maja 2024 r.

prof. dr hab. inż. Anna Fabijańska
Politechnika Łódzka
Instytut Informatyki Stosowanej
Ul. Stefanowskiego 18
90-537 Łódź
anna.fabijanska@p.lodz.pl

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej **mgr inż. Aleksandry Wilczewskiej**
nt. Metoda wyznaczania przemieszczeń i odkształceń lewej komory serca z użyciem danych echokardiograficznych poprzez elastyczne dopasowanie obrazów wzbogacone o informację z segmentacji

Promotor dr hab. inż. Jakub Żmigrodzki
Promotor pomocniczy: dr inż. Szymon Cygan

1. Podstawa sporządzenia recenzji

Podstawą do sporządzenia niniejszej recenzji była Uchwała nr 139/II-IB/2024 Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna Politechniki Warszawskiej z dnia 13 marca 2024 r., wyznaczająca mnie do pełnienia funkcji recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia naukowego doktora mgr inż. Aleksandry Wilczewskiej. Recenzja została sporządzona na podstawie przedłożonego tekstu rozprawy. Postępowanie prowadzone jest w naukach inżyniersko-technicznych, w dyscyplinie Inżynieria Biomedyczna.

2. Cel i zakres tematyczny rozprawy

W ogólnym ujęciu tematyka recenzowanej rozprawy dotyczy komputerowego wspomaganie medycznej diagnostyki obrazowej. Jest to istotny i współcześnie bardzo dynamicznie rozwijający się interdyscyplinarny obszar nauki i techniki, koncentrujący się na rozwoju systemów obrazujących i informatycznych, które wspomagają lekarzy radiologów w interpretacji obrazów medycznych różnych modalności, m.in. w zakresie wykrywania zmian chorobowych i ich charakteryzowania, wspomaganie diagnozy oraz planowania leczenia.

Doktorantka skupia swoją uwagę na problemie oceny deformacji mięśnia lewej komory serca za pomocą echokardiografii, będącej nieinwazyjną metodą obrazowania ultradźwiękowego, która odgrywa istotną rolę w diagnostyce chorób serca. Analiza sekwencji echokardiograficznych dostarcza istotnych informacji o strukturze i funkcji mięśnia sercowego, jednak manualna interpretacja tych obrazów jest czasochłonna, wymaga dużej wiedzy eksperckiej i doświadczenia, oraz może być podatna na subiektywizm. W tym kontekście Doktorantka podejmuje problem automatyzacji procesu analizy informacji obrazowej zawartej w kolejnych klatkach sekwencji echokardiograficznej. Cel rozprawy określony jest dość zdawkowo, ale jasno jako „*opracowanie i weryfikacja nowej metody wyznaczania przemieszczeń i odkształceń mięśnia lewej komory serca*”.

Automatyczne wyznaczanie odkształceń lewej komory serca jest problemem istotnym, ponieważ może przyczynić się do poprawy dokładności diagnozy chorób serca oraz standaryzacji pomiarów. Potencjalnie, może również prowadzić do rozwoju nowych metod diagnostycznych i terapeutycznych chorób serca. Ponadto, pomimo znaczącego postępu, który w ostatnich latach nastąpił w tej dziedzinie, nie jest to problem w pełni rozwiązany i aktualnie stanowiący przedmiot badań. Dlatego problem temat podjęty przez Doktorantkę uważam za aktualny. Natomiast metody wykorzystywane przez Doktorantkę, tj. elastyczne dopasowanie obrazów (ang. *image registration*) oraz metoda aktywnych konturów, są aktualnie poza okresem świetności i popularności. Te ostatnie miały miejsce ponad dekadę temu, o czym świadczą również wskazane w rozprawie referencje do prac bezpośrednio powiązanych z tematyką rozprawy. Metody dopasowania obrazów oraz aktywne kontury są cennymi narzędziami, które przyczyniają się do ogólnego procesu analizy deformacji mięśnia lewej komory serca. Jednakże, to metody oparte na szeroko rozumianym uczeniu głębokim stanowią aktualny stan wiedzy w rozważanym przez Doktorantkę obszarze.

Zakres tematyczny rozprawy, w szczególności fakt, że przedmiotem rozważań Doktorantki jest problem opracowania dedykowanych algorytmów analizy sekwencji echokardiograficznych, pozwala w mojej ocenie zakwalifikować rozprawę do **dyscypliny naukowej inżynieria biomedyczna**.

3. Układ rozprawy i treść poszczególnych rozdziałów

Recenzowana rozprawa obejmuje 147 stron maszynopisu podzielonych na osiem numerowanych sekcji poprzedzonych podziękowaniami oraz streszczeniami w językach polskim i angielskim. Układ pracy jest typowy i zasadniczo nie wzbudza zastrzeżeń. Struktura i podział treści kolejnych rozdziałów w większości tworzą logiczną i spójną całość.

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do rozważanego w pracy problemu pomiaru przemieszczeń i odkształceń lewej komory serca na podstawie danych echokardiograficznych. Po dość zdawkowym omówieniu znaczenia problemu, celu i zakresu pracy, Autorka wprowadza wybrane pojęcia z zakresu echokardiografii oraz omawia zagadnienia potrzebne do zrozumienia zagadnień rozważanych w pracy. W szczególności wyjaśnia podstawy obrazowania ultradźwiękowego, wprowadza pojęcie struktury speklowej oraz uzasadnia możliwość wykorzystania analizy przemieszczenia spekli do badania przemieszczenia obrazowanej tkanki w przypadku małych przemieszczeń. Następnie dokonuje charakterystyki metod wykorzystywanych do regionalnej i globalnej oceny funkcji mięśnia sercowego na podstawie danych ultrasonograficznych, w tym poprzez wyznaczenie przemieszczeń i odkształceń mięśnia sercowego na podstawie wyników segmentacji danych echokardiograficznych. Wyjaśnia zasadę działania metody elastycznego dopasowania obrazów oraz, w kontekście segmentacji obrazów echokardiograficznych, dokonuje przeglądu metod wykorzystujących w tym procesie informację o konturze.

Rozdział 2 rozpoczyna zasadniczą część rozprawy i poświęcony jest opisowi autorskiego algorytmu wyznaczania odkształceń i przemieszczeń lewej komory serca. Autorka opisuje kolejne kroki metody oraz sposób ich wykonania. W szczególności, opisuje etap segmentacji mięśnia lewej komory serca, komponenty składowe metody elastycznego dopasowania obrazów (transformacja, interpolacja, funkcja kosztu, optymalizacja) z uwzględnieniem autorskiej modyfikacji funkcji kosztu. Rozdział kończy opis zastosowanego sposobu wyznaczania przemieszczeń i odkształceń lewej komory serca.

Rozdział 3 opisuje proces przygotowania danych referencyjnych wykorzystanych w rozprawie do określenia dokładności proponowanej metody. W szczególności, kolejne podrozdziały opisują sposób przygotowania danych syntetycznych w drodze numerycznej symulacji sekwencji echokardiograficznych przedstawiających model fantomu oraz w wyniku obrazowania rzeczywistego fantomu serca połączonej z symulacją numeryczną. Następnie opisane zostały dane semi-syntetyczne pochodzące z otwartej bazy, symulujące sekwencje echokardiograficzne uzyskane aparatami różnych producentów oraz dane rzeczywiste – również z zasobów publicznych. Rozdział kończy opis zastosowanej procedury estymacji błędów wyznaczenia przemieszczeń i odkształceń lewej komory serca.

Rozdział 4 poświęcony jest problemowi parametryzacji proponowanej funkcji kosztu dla metody elastycznego dopasowania obrazów, w szczególności określenia wpływu wag kary niedopasowania masek i kary gładkości na dokładność wyznaczania odkształceń mięśnia sercowego. Doktorantka przedstawia wyniki eksperymentów uzyskane w drodze przeszukiwania kombinacji wybranych wartości parametrów, również z uwzględnieniem wpływu dokładności wyników segmentacji mięśnia sercowego.

Rozdział 5 przedstawia wyniki działania oraz weryfikacji autorskiego algorytmu, a także dokonuje ich analizy. Rozdział przedstawia również czas wykonania algorytmu.

Rozprawę zamyka podsumowanie zawarte w **Rozdziale 6**. Po nim następuje wykaz materiałów źródłowych, dość nietypowo zawarty w numerowanym rozdziale (Rozdział 7). Ponadto, do rozprawy dołączony został również dodatek ze szczegółowymi wynikami oceny dokładności działania zaproponowanej metody w różnych scenariuszach weryfikacji oraz segmentach mięśnia sercowego (Rozdział 8).

4. Oryginalny wkład Doktorantki

4.1. Rozszerzenie algorytmu elastycznego dopasowania obrazów

Zasadniczym osiągnięciem rozprawy jest zautomatyzowana metoda pomiaru przesunięć i odkształceń lewej komory serca na podstawie badań echokardiograficznych. Główna koncepcja metody bazuje na porównaniu położenia punktów referencyjnych należących do mięśnia lewej komory serca w kolejnych klatkach nagrania echokardiograficznego obrazującego pracę serca. Przesunięcie punktów referencyjnych definiuje odkształcenie lewej komory serca w obszarach, w których punkty są zlokalizowane. Znalezienie nowej lokalizacji badanych punktów w kolejnej klatce realizowane jest w drodze elastycznego dopasowania par następujących po sobie klatek badania ultrasonograficznego. Sam algorytm elastycznego dopasowania obrazów z wykorzystaniem krzywych B-sklejanych jest znany i dobrze ugruntowany w literaturze przedmiotu. Jednakże Doktorantka proponuje rozszerzenie funkcji kosztu algorytmu (tj. miary niedopasowania obrazów) o dodatkowy czynnik wynikający z niedopasowania binarnych masek przedstawiających obszar lewej komory serca, uzyskanych z bieżącej klatki oraz klatki poprzedzającej po elastycznej transformacji. Karę niedopasowania Doktorantka definiuje jako sumę kwadratów różnic wartości pikseli maski w bieżącej klatce oraz klatce poprzedzającej po elastycznej transformacji. Po transformacji, maski z obu klatek powinny się pokrywać, więc tak zdefiniowany komponent funkcji kosztu, obok podobieństwa obrazów docelowego i transformowanego mierzonego na poziomie jasności pikseli oraz gładkości, powinien wpływać pozytywnie na jakość dopasowania obrazów, a tym samym na dokładność pomiaru odkształceń mięśnia sercowego. Dodatkowo, Doktorantka proponuje mechanizm ważenia siły wpływu tego komponentu, poprzez współczynnik wyznaczony w drodze porównania masek w sekwencji

z obrazami w sekwencji. W celu uzyskania masek binarnych mięśnia lewej komory serca w zależności od danych (syntetyczne, rzeczywiste) Doktorantka proponuje wykorzystanie metody aktywnego konturu lub splotowej sieci neuronowej z wykorzystaniem implementacji wbudowanych w komercyjne oprogramowanie PMOD.

Pomiar odkształceń dokonywany jest wzdłuż linii środkowej mięśnia lewej komory serca dla punktów referencyjnych należących do wybranych segmentów serca. Przemieszczenie wyznaczone jest pomiędzy kolejnymi klatkami w sekwencji poprzez porównanie współrzędnych punktów referencyjnych. Natomiast odkształcenie określane jest jako procentowa zmiana długości segmentu, rozumianego jako długość krzywej łączącej punkty charakterystyczne przyłożone wzdłuż linii środkowej mięśnia lewej komory serca.

4.2. Weryfikacja eksperymentalna

Doktorantka zaplanowała i przeprowadziła obszerną eksperymentalną weryfikację proponowanej metody wyznaczania przemieszczeń i odkształceń lewej komory serca. W tym celu wykorzystywała dane obrazowe o rosnącym stopniu trudności. W szczególności analizowała działanie metody w odniesieniu do (i) danych syntetycznych będących numeryczną symulacją badania echokardiograficznego serca z obszarami i obniżonej kurczliwości, (ii) danych syntetycznych pochodzących z obrazowania fantomu materialnego lewej komory serca, (iii) danych semi-syntetycznych udostępnionych w otwartej bazie danych, symulujących pracę serca w kilku różnych stanach klinicznych oraz naśladujących badania od siedmiu różnych producentów aparatury USG oraz (iv) rzeczywistych sekwencji kardiograficznych. W symulacjach numerycznych wykorzystywała metodę elementów skończonych.

W pierwszym wariancie (dane syntetyczne) segmentację mięśnia lewej komory serca przeprowadziła metodą aktywnego konturu w bazowej wersji dokonując ręcznej inicjalizacji na pierwszej klatce sekwencji USG, na kolejnych natomiast – wynikiem segmentacji z klatki poprzedniej. Maski dodatkowo zdeformowała, symulując w ten sposób błędy segmentacji na obrazach rzeczywistych i odniosła do wyników wzorcowych znanych z uwagi na wykorzystanie fantomu numerycznego. W wariancie drugim dokonała symulacji numerycznej odpowiedzi modelu nałożonego na rzeczywisty fantom na wymuszenie symulujące rzeczywiste. Uzyskała w ten sposób dane referencyjne dot. przemieszczenia i odkształcenia fantomu w pojedynczym cyklu pracy. Maski referencyjne oraz wyniki segmentacji uzyskała analogicznie jak w wariancie pierwszym. Dane semi-syntetyczne poddała segmentacji metodą aktywnego konturu wbudowaną w komercyjne oprogramowanie PMOD, a uzyskane wyniki odniosła do położenia punktów referencyjnych dostarczonego wraz ze zbiorem danych. W przypadku danych rzeczywistych, segmentację mięśnia lewej komory serca wykonała algorytmem bazującym na splotowej sieci neuronowej, również wbudowanym w komercyjne oprogramowanie PMOD.

Przed finalnymi eksperymentami mającymi na celu walidację metody, Doktorantka przeprowadziła eksperymenty mające na celu znalezienie najlepszych zakresów parametrów proponowanej metody, w szczególności wag dwóch składowych funkcji kosztu, tj. gładkości i kary niedopasowania masek. W tym celu wykorzystywała przeszukiwanie siatki parametrów (ang. *Grid Search*) w odniesieniu do danych syntetycznych oraz semi-syntetycznych. Następnie, ustalone zakresy parametrów uwzględniła podczas eksperymentów określających dokładność pomiaru przemieszczeń i odkształceń z wykorzystaniem proponowanej metody w wariancie: (i) bez kar, (ii) z samą karą gładkości (benchmark), (iii) samą karą niedopasowania masek oraz (iv) wariancie z dwoma karami. Porównała również wyniki działania metody dla maski referencyjnej mięśnia lewej komory serca wykorzystanej przy dopasowaniu i maski uzyskanej z segmentacji.

Eksperymenty wykazały, że uwzględnienie informacji dot. wyników segmentacji w procesie dopasowania obrazów z kolejnych klatek pozwala zwiększyć dokładność wyznaczania przemieszczeń i odkształceń lewej komory serca na podstawie sekwencji echokardiograficznej w przypadku danych syntetycznych i semi-syntetycznych. W przypadku danych rzeczywistych Doktorantka nie zbadała bezpośrednio przemieszczeń i odkształceń, wykazała natomiast, że modyfikując funkcję kosztu można poprawić dokładność dopasowania masek w klatkach docelowej i po transformacji, co powinno pozytywnie przełożyć się na dokładność szacowania przemieszczeń i odkształceń. Ponadto, Doktorantka zbadała wpływ maski segmentacji na wynik dopasowania, wykazując niewielką przewagę płynącą z wykorzystania masek referencyjnych.

Metoda proponowana przez Doktorantkę jest koncepcyjnie przekonująca, podobnie jak sposób przeprowadzenia eksperymentów weryfikujących dokładność proponowanej metody w odniesieniu do jej wersji bazowej. Część eksperymentalna jest bardzo rozbudowana i zdaje się dominować zawartość rozprawy. Z prezentowania części wyników można by zrezygnować bez szkody dla merytorycznej wartości rozprawy.

Rozprawa nie informuje o praktycznym zastosowaniu uzyskanych wyników badań (np. w drodze udostępnienia kodu źródłowego metody, aplikacji ją implementującej, lub wtyczki do istniejącego oprogramowania).

5. Uwagi krytyczne i polemiczne

1. Rozprawa jest słabo osadzona w aktualnym stanie wiedzy. W szczególności przegląd i analiza najnowszych prac dotyczących analizy obrazów echokardiograficznych w kontekście segmentacji mięśnia lewej komory serca oraz zautomatyzowanej analizy ich odkształceń jest powierzchowny. Doktorantka w zasadzie pomija najnowsze osiągnięcia związane z tematyką rozprawy, w tym zastosowanie szeroko rozumianego uczenia głębokiego do segmentacji obrazów kardiograficznych, śledzenia i modelowania ruchu mięśnia sercowego (co pośrednio realizuje również w rozprawie), jak również badań realizowanych w odniesieniu do echokardiografii 3D. Nie komentuje także możliwości oprogramowania komercyjnego w zakresie pomiaru przemieszczeń i odkształceń mięśnia sercowego. Do rozprawy załączono spis piśmiennictwa pośrednio lub bezpośrednio związanego z tematyką rozprawy. Obejmuje on ok. 90 pozycji literaturowych opublikowanych w latach 1971-2022, przy czym prace z ostatnich pięciu lat (tj. opublikowane od 2019 r.) stanowią ok. 20% cytowanych prac. W rozprawie zabrakło odniesienia do najnowszych prac powiązanych z tematyką rozprawy (tj. opublikowanych w latach 2023-2024). Prace opublikowane przed rokiem 2000 stanowią ok. 25% cytowanych w rozprawie źródeł. Najczęściej reprezentowany okres w cytowanej przez Doktorantkę literaturze (ok. 40%) przypada na lata 2010-2018.
2. We wstępie Doktorantka wskazuje, że w rozprawie skupia się na jednej z podgrup metod pozwalających na wyznaczenie przemieszczeń i odkształceń mięśnia sercowego, tj. technice śledzenia spekli (ang. *Speckle Tracking Echocardiography*, STE). Metody z tej grupy śledzą położenie spekli w kolejnych klatkach badania i na tej podstawie wyznaczają deformacje mięśnia sercowego lewej komory. Z rozprawy nie wynika jednak, w jaki sposób i czy w ogóle informacja wynikająca ze zmian położenia spekli jest wykorzystywana przez zaproponowany przez Doktorantkę algorytm.
3. Jednym z istotnych etapów zaproponowanej w rozprawie metodologii jest segmentacja mięśnia lewej komory serca z kolejnych klatek sekwencji echokardiograficznej. Jak wykazano w rozprawie, dokładność segmentacji ma kluczowe znaczenie dla jakości dopasowywania obrazów, a co za tym idzie dokładności wyznaczenia odkształceń mięśnia lewej komory serca.

Sam proces segmentacji Doktorantka opisuje jednak bardzo zdawkowo, sprowadzając go do stwierdzenia, że zastosowała metodę aktywnych konturów lub wbudowany w oprogramowanie PMOD algorytm segmentacji bazujący na splotowej sieci neuronowej. Rozprawa nie dostarcza jednak szczegółów dot. np. architektury wykorzystanej sieci neuronowej, jej hiperparametrów, czy sposobu uczenia, co ogranicza powtarzalność eksperymentów opisanych w rozprawie, podobnie jak fakt ograniczenia weryfikacji proponowanego rozwiązania na danych innych niż w pełni syntetyczne, do metod wbudowanych w konkretne oprogramowanie komercyjne. Fakt, że Doktorantka nie podjęła próby opracowania własnej metody segmentacji stanowi istotne zawężenie problemu i ograniczenie wkładu naukowego w rozwój zautomatyzowanych metod badania odkształceń mięśnia sercowego.

4. Opis wykonania autorskiej metody nie zawsze jest jednoznaczny. Przykładowo, Doktorantka pisze o punktach referencyjnych wykorzystywanych przy dopasowaniu i pomiarze przesunięć. Nie jest jednak jasne, skąd pochodziły punkty referencyjne? Czy były to po prostu współrzędne pikseli zewnętrznego i wewnętrznego obrysu mięśnia sercowego? Pomiar przesunięcia realizowany jest wzdłuż linii środkowej mięśnia – jak ją wyznaczono? Ponadto, Doktorantka używa pojęcia maski zarówno w odniesieniu do wyników segmentacji uzyskanych wybranymi metodami, jak i referencyjnych wyników segmentacji, co czasami utrudnia zrozumienie procedury eksperymentalnej.
5. Doktorantka odnosi wyniki proponowanej metody jedynie do wyników uzyskanych z bazowej wersji algorytmu elastycznego dopasowania obrazów. Niestety, w pracy zabrakło odniesienia do wyników nowszych rozwiązań dedykowanego problemu, co jest dużą słabością procesu weryfikacji eksperymentalnej, jak również ograniczeniem we wykazaniu istotnego wkładu w aktualny stan wiedzy. Ponadto, weryfikacja autorskiej metody ma miejsce głównie w odniesieniu do danych syntetycznych, a pozytywny wpływ faktu uwzględnienia masek segmentacji w procesie dopasowania obrazów zdaje się maleć z „trudnością” analizowanych obrazów. Ocena dokładności działania metody na danych rzeczywistych jest jedynie pośrednia. W szczególności Doktorantka nie zmierzyła odkształceń i przemieszczeń lewej komory mięśnia sercowego na danych rzeczywistych, a jedynie wykazała, że zastosowanie autorskiego podejścia pozwala poprawić stopień dopasowania masek segmentacji w kolejnych klatkach. Z uwagi na brak pełnych wyników wzorcowych, w przypadku danych rzeczywistych nie przeanalizowała również całego cyklu pracy serca.
6. W eksperymentach dotyczących parametryzacji metody nie jest jasne, co oznacza *zestaw danych*. Czy jest to jedno badanie echokardiograficzne (sekwencja klatek), czy kilka badań analizowanych grupowo? W eksperymencie uwzględniającym dane syntetyczne z wtrąceniem oraz dane semi-syntetyczne wykorzystano po jednym *zestawie danych*. *Zestaw danych* będący jednym badaniem obrazowym, to zdecydowanie za mało, aby wyciągać wiarygodne wnioski dot. parametryzacji algorytmu. Doktorantka nie precyzuje również rozdzielczości przestrzennej i czasowej analizowanych sekwencji echokardiograficznych.
7. Funkcja kosztu uwzględniona w finalnej wersji algorytmu posiada trzy składniki. Nie jest zatem jasne, dlaczego w procesie parametryzacji analizowano wpływ i siłę wpływu tylko dwóch składników (tj. kary gładkości i niedopasowania masek)?
8. Waga kary niedopasowania masek (Równ. 23, str. 44) uwzględnia kolejne klatki oraz maski w sekwencji echokardiograficznej. Czy są to wszystkie klatki, tzn. metoda z założenia działa offline i wymaga zarejestrowania pełnej sekwencji, wykonania segmentacji mięśnia sercowego, a następnie wyznaczenia kary i uruchomienia algorytmu elastycznego

dopasowania obrazów? Jak długość zarejestrowanej sekwencji (np. cały cykl, pół cyklu) wpływa na wartość wagi i dokładność algorytmu?

9. W eksperymencie dotyczącym badania wpływu dokładności segmentacji lewej komory mięśnia sercowego na dokładność wyznaczania odkształceń, nie jest jasne na czym oparto założenie, że zniekształcenia wprowadzone sztucznie (np. w wyniku operacji morfologicznych o rosnącej sile, lub deformacji siatki) do masek segmentacji będą faktycznie oddawały rzeczywiste wyniki segmentacji w różnych scenariuszach będące wynikiem faktycznych odkształceń lewej komory serca? Ponadto, wyniki zaprezentowane w rozprawie (Rys. 27-30) przedstawiające błąd pomiaru w zależności od przyłożonej do maski segmentacji deformacji, słabo obrazują związek dokładności segmentacji z błędem pomiaru odkształceń. Zdecydowanie lepszym sposobem zobrazowania tej zależności byłoby np. powiązanie błędu pomiaru odkształceń ze współczynnikiem DICE lub IoU.
10. W części eksperymentów błędy wyznaczania przemieszczeń i odkształceń analizowano w segmentach. Skąd pochodziły informacje o segmentach. Jak w praktycznym zastosowaniu (np. stosując segmentację bazującą na aktywnym konturze) uzyskać podział na segmenty?
11. Dyskusja wyników sprowadza się w większości do słownego podsumowania błędów w procentach oraz wynikających z nich wartości statystycznym. Doktorantka nie podejmuje się jednak postawienia hipotezy dotyczącej przyczyn różnic wyników np. w poszczególnych segmentach lub widokach, lub różnic we wpływie poszczególnych komponentów funkcji kosztu.
12. Zgodnie z danymi przedstawionymi w rozprawie (Tabela 15), wykonanie algorytmu na pełnej sekwencji danych trwa od kilkunastu do kilkadziesiąt minut. Jak ten czas ma się do ręcznego wykonania pomiaru przez eksperta. Czy algorytm o takim czasie wykonania stanowi rzeczywiste usprawnienie w stosunku do manualnego pomiaru?
13. Jakie są istotne różnice pomiędzy proponowaną przez Doktorantkę metodą elastycznego dopasowania obrazów z uwzględnieniem masek segmentacji, a popularnym jakiś czas temu podejściem do elastycznego dopasowania obrazów bazującym na punktach charakterystycznych (ang. *landmarks*) oraz segmentacji obrazów bazującej na atlasach (ang. *atlas based image segmentation*)?
14. Niektóre rozdziały w rozprawie, mają jeden podrozdział (np. 1.2.1). W takim przypadku nie ma zasadności wydzielenia podrozdziału, podobnie jak tworzenia jednoakapitowych podrozdziałów (np. 1.3).

6. Strona edytorska rozprawy

Rozprawa jest przygotowana starannie od strony edytorskiej. Sposób prezentacji danych oraz wyników jest czytelny i zasadniczo nie wzbudza zastrzeżeń. Ilustracja graficzna jest obszerna i właściwie dobrana do treści. Jakość ilustracji jest w zdecydowanej większości odpowiednia.

7. Dorobek publikacyjny Autorki

Mgr inż. Aleksandra Wilczewska jest współautorką trzech artykułów naukowych zaindeksowanych w bazie Scopus i opublikowanych w latach 2017-2022. W szczególności, są to dwa artykuły w czasopiśmie uwzględnionych w JCR i posiadających współczynnik wpływu (*Ultrasonic Imaging*, IF 2.3, 70 pkt., 2022; *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, IF 3.6, 100 pkt., 2018) oraz referat konferencyjny wydany w serii wydawniczej Springer (2017). Ww. prace są związane z tematyką recenzowanej rozprawy, a czasopisma

w których zostały opublikowane – zaliczane m.in. do dyscypliny Inżynieria Biomedyczna. Oceniam, że jest to dorobek przeciętny - typowy na tym etapie kariery naukowej. Zgodnie z bazą Scopus index H Doktorantki wynosi 2, a Jej publikacje były cytowane 7 razy – głównie przez Współautorów. Nie zyskały więc zainteresowania szerszego środowiska naukowego.

8. Podsumowanie

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. **Aleksandry Wilczewskiej** nie jest oczywista w ocenie. Zdaje się należeć do prac długą historią, które rozpoczęte wiele lat temu należy ocenić w kontekście aktualnego stanu wiedzy, w szybko zmieniającym się obszarze szerokokorozumianego wspomagania medycznej diagnostyki obrazowej.

Zaproponowana w rozprawie metoda automatycznego pomiaru przemieszczeń i odkształceń lewej komory serca **stanowi oryginalne rozwiązanie** zdefiniowanego w rozprawie problemu naukowego. Doktorantka wykazała się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Wybrała odpowiednie metody badawcze, zaprojektowała i przeprowadziła eksperymenty weryfikujące autorską metodę. Wykazała przewagę autorskiego podejścia nad bazowym rozwiązaniem wykorzystującym algorytm elastycznego dopasowania obrazów (1999). Doktorantka nie odniosła jednak autorskiej metody do nowszych rozwiązań i słabo osadziła ją w aktualnym stanie wiedzy, tym samym ograniczając uzasadnienie swojego wkładu w rozważany obszar naukowy.

Pomimo uwag krytycznych, uwag oceniam, że **rozprawa doktorska mgr inż. Aleksandry Wilczewskiej spełnia wymagania** określone art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce oraz **wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej Autorki do publicznej obrony.**