

Politechnika Warszawska  
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Warszawa, 4 października 2016 r.

D z i e k a n a t

Uprzejmie informuję, że na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej odbędzie się w dniu 18 października 2016 r. publiczna obrona rozprawy doktorskiej

**mgr inż. Konrada Werysa**

**temat: „Cardiac motion analysis method based on cinematographic MRI”**

**promotor – dr hab. inż. Piotr Bogorodzki, prof. Politechniki Warszawskiej**

**recenzenci:**

**dr hab. inż. Jerzy Wtorek, prof. Politechniki Gdańskiej**

**prof. dr hab. inż. Piotr Augustyniak z Akademii Górniczo-Hutniczej**

Obrona odbędzie się w dniu 18 października 2016 r. w Audytorium Centralnym na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych – Gmach im. Janusza Groszkowskiego, Warszawa, ul. Nowowiejska 15/19; początek godz.9.00.

Po adresem: [www.elka.pw.edu.pl/Wydzial/Rada-Wydzialu/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje](http://www.elka.pw.edu.pl/Wydzial/Rada-Wydzialu/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje) zapewniony jest na stronie Wydziału dostęp do tekstów streszczenia rozprawy i recenzji, jak również do tekstu rozprawy umieszczonej w Bazie Wiedzy Politechniki Warszawskiej.

Dziekan



prof. dr hab. inż. Krzysztof Zaremba

**Autor pracy: mgr inż. Konrad Werys**

**Promotor:**

prof. nzw. dr hab. Piotr Bogorodzki

**Tytuł: “Cardiac motion analysis method based on cinematographic MRI”.**

**Streszczenie po angielsku:**

Magnetic Resonance Imaging (MRI) is a completely non-invasive cardiac motion visualization technique. Although incredible progress has been made in this area, it is still not possible to quantify local cardiac motion from typical cardiac MRI data.

This dissertation addresses this problem and a new quantification methodology called Deformable Image Registration in Cine (DIRAC) is proposed. It has two unique features: it operates on cine MRI scanning protocol data, a part of clinical cardiac examination, and runs semi-automatically without user interaction. This methodology eliminates a tedious and time-consuming part of the data processing stream, usually involving highly trained physicians to perform manual processing of the data.

DIRAC was evaluated on a two-stage procedure: first on simulated data, where a mathematical motion model was used in order to generate cine data with known heart displacements, and subsequently on real cardiac MRI data provided by the Motion Tracking Challenge 2011 at the MICCAI conference.

The evaluation of the results showed sub-millimeter DIRAC accuracy in motion tracking and comparable accuracy to other methods in considerably shorter time (15 minutes compared to 6 hours).

Finally, a clinical DIRAC application to Cardiac Resynchronization Therapy (CRT) was presented. Results showed that a developed biomarker gave 80% accuracy in predicting CRT outcome in a group of 52 patients.

In summary, a new local cardiac motion quantification method was developed. Presented results also suggest that DIRAC can be useful in clinical diagnosis and can solve real clinical problems.

**Streszczenie po polsku:**

Technika rezonansu magnetycznego - Magnetic Resonance Imaging (MRI) - daje możliwość w pełni nieinwazyjnego obrazowania ruchu serca. Pomimo ogromnego postępu który nastąpił w tej dziedzinie, ilościowa informacja na temat lokalnych przemieszczeń nie jest dostępna przy użyciu danych z typowego badania MRI serca.

W niniejszej pracy zaproponowano nową metodę wyznaczenia lokalnych parametrów ruchu - Deformable Image Registration in Cine (DIRAC). Metoda ta opiera się na algorytmie nieszttywnej korejstracji obrazów. Posiada dwie unikatowe cechy. Na wejściu wymaga jedynie kinematograficznych sekwencji danych typu cine - części typowego badania MRI serca. Co więcej, nie wymaga od lekarza dodatkowego manualnego przetwarzania danych.

Przy użyciu matematycznych modeli ruchu oszacowano, że DIRAC umożliwi śledzenie ruchu serca z submilimetrową dokładnością. Używając publicznie dostępnych danych testowych stwierdzono, że stosując zaproponowaną metodę analizy DIRAC otrzymane wyniki są porównywalne z innymi opisanymi w literaturze metodami w znacznie krótszym czasie (15 minut vs. 6 godzin).

Terapia resynchronizująca serca jest jedną z efektywnych form leczenia niewydolności serca. Pomimo, że znacznie poprawia jakość życia i długość życia większości pacjentów, u 30-50% nie przynosi pożądanych efektów. Przydatność DIRAC do przewidywania odpowiedzi na tą terapię została przetestowana na danych 52 pacjentów. Wstępne wyniki są obiecujące, zaproponowany biomarker przewiduje odpowiedź z 80% skutecznością w analizowanym zestawie danych.

Podsumowując, opracowana została nowa metoda do wyznaczenia ilościowej informacji na temat ruchu serca na podstawie danych MRI - DIRAC. Pierwszy udany eksperymenty przedstawione w niniejszej pracy sugerują, że DIRAC będzie mógł być wykorzystywany w diagnozie i planowaniu leczenia chorób serca.

***KWESTIONARIUSZ – RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY WYDZIAŁU  
ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH  
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ***

Tytuł rozprawy: Cardiac Motion Analysis Method Based on Cinematographic MRI

Autor rozprawy: mgr inż. Konrad Werys

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Monitorowanie obiektów, które zmieniają się w czasie w wyniku zachodzących w nich procesów, od wielu lat jest przedmiotem zainteresowania zarówno lekarzy jak i specjalistów pracujących nad rozwojem metod diagnostycznych, w tym obrazowych. Do tego celu wykorzystywane są między innymi metody przekształcania obrazów. Klasycznym przykładem zastosowania takiego podejścia jest łączenie obrazów uzyskanych za pomocą różnych technik (modalności), np. tomografii komputerowej (ang. CT) i emisyjnej tomografii pozytonowej (ang. PET). Łączenie (fuzja, nakładanie, korejstracja) takich obrazów stanowi niezwykle cenne narzędzie wykorzystywane w procesie przygotowania zabiegu, np. operacji neurochirurgicznej. Należy podkreślić, że korejstracja obrazów obiektów deformowalnych nie jest zagadnieniem łatwym, szczególnie gdy rozważamy przypadek obrazowania wewnętrznych organów człowieka istotnie zmieniających swoje rozmiary i/lub położenie (np. płuca, serce).

Autor rozprawy za główny cel prowadzonych prac postawił sobie opracowanie dodatkowej funkcjonalności tomografii MRI umożliwiającej ilościową ocenę wybranego segmentu ściany lewej komory serca. Ponadto przyjął, że cel ten osiągnie nie obciążając zbyt dużym nakładem pracy użytkownika tomografu (lekarza, operatora, personelu obsługującego) chcącego z tej funkcjonalności skorzystać. Propozycja algorytmu, o nazwie DIRAC, spełniającego postawione wymagania została przedstawiona w trzecim rozdziale rozprawy. Należy podkreślić, że „klasyczne” dane otrzymywane podczas kardiologicznego badania MRI są w tym przypadku wystarczające do osiągnięcia założonego celu. Mgr inż. Konrad Werys zaproponował metodę pomiaru/szacowania kurczliwości wybranych segmentów lewej komory serca na podstawie danych pozyskanych pomocą sekwencji bSSFP (Balanced Steady Free Precession) i bramkowania retrospektywnego.

Doktorant założył, że proponowana metoda będzie uzasadniona wtedy, gdy dane wymagane do przewidywanych obliczeń będą odpowiednio dokładne. Postawił też, że jest możliwe opracowanie algorytmu śledzenia ruchu (serca) na podstawie danych obrazowych otrzymywanych za pomocą techniki MRI i przetwarzanych za pomocą metody DIRAC –Deformable Image Registration in Cine z sub-milimetrową dokładnością. Z kolei taka dokładność umożliwia ocenę efektu (skutku) terapii. Jak należy się domyślać chodzi o terapię resynchronizującą pracę serca.

Teza dość wiernie oddaje osiągnięte i przedstawione w rozprawie wyniki. Zaproponowany algorytm składa się z sześciu kroków: 1). przetwarzania wstępnego (m.in. minimalizującego wpływ oddechu), 2). wstępnej, liniowej korejstracji, 3). korejstracji deformowalnej, 4). korejstracji obrazów dynamicznych, 5). manualnego zaznaczenia konturów oraz 6). obliczenia odkształceń. Wymienione powyżej składowe charakteryzują się różną złożonością. Najbardziej złożony jest krok 3. składający się z takich elementów jak a). parametryzacja operacji transformacji, b). oceny podobieństwa obrazów, c). regularyzacji i d). optymalizacji operacji korejstracji deformowalnej. W rezultacie otrzymuje się wartości odkształcenia obwodowego i radialnego (Rys. 3.8) przypisane do segmentów serca oznaczonych zgodnie z 17 segmentowym modelem AHA.

Wyniki badań dowodzące słuszność postawionej tezy znajdujemy w podrozdziale 4.2.2 i w dodatkach A i B. W podrozdziale 4.2.2 Autor przedstawia oszacowanie błędów, które otrzymał wykorzystując opracowany symulator ruchu serca (Rys. 4.2-4.5). Otrzymane w tych badaniach błędy, w przypadku obrazu 2D, rzeczywiście nie przekraczają milimetra. Wynik oceny grupy chorych za pomocą opracowanego wskaźnika CDI został przedstawiony w dodatku A, podczas gdy w dodatku B przedstawiono wyniki obliczeń przemieszczenia i ich walidację za pomocą danych udostępnionych przez organizatorów konkursów odbywających się w ramach znanych konferencji naukowych. Zaproponowany wskaźnik obliczany dla obrazu bazowej warstwy serca daje podobne, a nawet lepsze wyniki niż te, które otrzymywane są za pomocą tradycyjnych wskaźników dyssynchronii serca bazujących na klasycznym badaniu tMRI.

Implementacja, a następnie badania właściwości algorytmu DIRAC wymagały od Doktoranta znajomości, oprócz fizycznych i matematycznych podstaw MRI, wybranych zagadnień z przetwarzania i modelowania obrazów, np. metod interpolacji, teorii korejstracji obiektów deformowalnych, czy modelowania operacji korejstracji. W tym zakresie w dużym stopniu doktorant posiłkował się znanymi z literatury rozwiązaniami (co nie jest zarzutem). Za istotne osiągnięcie Doktoranta uważam propozycję nowego wskaźnika dyssynchronii serca i jego walidację. Uważam, że recenzowana rozprawa należy do kategorii rozpraw interdyscyplinarnych z przewidywanym zastosowaniem jej wyników w klinice. Świadczy to o opracowaniu udokumentowanego i potwierdzonego badaniami klinicznymi nowego narzędzia diagnostycznego.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł /w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle/ świadczący o dostatecznej wiedzy Autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonywujący?

Należy podkreślić, że rozważane w rozprawie zagadnienie mimo już wieloletniej jego historii jest ciągle aktualne i rozwijane w wielu ośrodkach badawczych na świecie. Stąd też literatura z nim związana jest b. bogata i ciągle uaktualniana. Dość stwierdzić, że wyszukiwarka Google na zapytanie „mri cardiac motion cine 2016” zwraca wiele milionów przypadków, w tym znaczną liczbę publikacji. Zatem obiektywnie rzecz biorąc Doktorant nie był w stanie przeprowadzić analizy wszystkich, dostępnych pozycji literatury. Jest to bowiem fizycznie niemożliwe. Natomiast stwierdzam, że odniósł się do wszystkich znanych mi i najczęściej cytowanych oraz traktowanych za „referencyjne” pozycji literatury, zarówno tych odnoszących się do teoretycznych podstaw opracowanego algorytmu, jak i tych zawierających wyniki pomiarów i eksperymentów klinicznych. Według mojej oceny, szeroka wiedza Doktoranta w zakresie poruszanych przez niego w rozprawie zagadnień nie budzi najmniejszych wątpliwości. Można nawet odnieść wrażenie, że Doktorant

wiele zagadnień traktuje jako oczywiste, co ma swoje odbicie w rozprawie i ich lapidarnym przedstawieniu. Zastrzeżenie moje budzi natomiast fakt całkowitego pominięcia artykułów (niewielu) dotyczących podobnych zagadnień, a opublikowanych w czasopismach polskich, lub przez polskich autorów w czasopismach zagranicznych, np. prac P. Szczypińskiego.

3. Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Doktorant postawił sobie, należy to podkreślić, ambitne zadania. Polegało ono nie tylko na opracowaniu algorytmu przetwarzania danych pozyskiwanych z badania MRI w celu określenia ruchu serca wywołanego jego cykliczną pracą, ale także na zaproponowaniu wskaźnika pozwalającego określić jakość tego ruchu (na podstawie jego zmienności w czasie jednego cyklu pracy serca). Autor założył, że wskaźnik ten powinien być przydatny w ocenie postępów terapii desynchronizacji serca. Żeby to osiągnąć należało – oprócz prac koncepcyjno-merytorycznych, projektowych i implementacyjnych – przeprowadzić badania walidacyjne w klinice. Dodatkowo Autor do potwierdzenia i jednocześnie sprawdzenia poprawności zaproponowanej metody użył danych udostępnionych przez organizatorów dwóch konkursów (Grand Challenge Left Ventricle Segmentation, Grand Challenge Motion Tracking). Oceniam, że dzięki takiemu podejściu przedstawiona rozprawa stanowi całość. Doktorant zaprojektował i wykonał „narzędzie pomiarowe”, następnie ocenił jego dokładność, a w ostatnim etapie wykazał jego przydatność w diagnozowaniu serca. Sam fakt prowadzenia badań na ludziach stawia dodatkowe, czasami trudne do spełnienia wymagania. Stąd słuszne było założenie żeby opracowywana metoda korzystała z danych dostępnych podczas standardowego kardiologicznego badania MRI (nie narażamy badanej osoby na dodatkowe obciążenie).

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Do osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć opracowanie i implementację algorytmu DIRAC, który pozwala na dokładne określenie pola przemieszczeń (miokardium) i konsekwencji wykonanie innych dodatkowych obliczeń. Należy podkreślić, że jest to jedna z nielicznych propozycji, która (prawie) nie wymaga interakcji ze strony operatora. Przynajmniej jest to jedyna propozycja tak szeroko udokumentowana. W literaturze przedmiotu, praktycznie poza nielicznymi doniesieniami konferencyjnymi, nie ma podobnych rozwiązań. A te które są, przedstawiają mniejsze zaawansowanie funkcjonalne. Do określenia dokładności zaproponowanego algorytmu Doktorant wykorzystał symulator ruchu serca, który został także przez niego opracowany i zaimplementowany. Przeprowadził także walidację algorytmu DIRAC, która wykazała, że uzyskano założoną w tezie rozprawy dokładność algorytmu. Walidacja została przeprowadzona, z wykorzystaniem danych z konkursu MTC2011, w celu porównania z innymi znanymi algorytmami. Porównanie to wykazało, że zaproponowany algorytm umożliwia uzyskanie lepszych wyników niż za pomocą innych, opisanych w literaturze propozycji. Do osiągnięć należy także zaliczyć zaproponowanie i uzasadnienie wartości wskaźnika CDI do oceny kurczliwości wybranego segmentu komory.

5. Czy Autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?

Praca napisana jest w nietypowy sposób. Główne wyniki badań zawarte są także w dodatkach, zawierających reprintsy opublikowanych przez Doktoranta, wraz ze współautorami, artykułów.

Natomiast poprzedzający je opis w dużym stopniu stanowi wprowadzenie do tematu, a także dokładniejsze, choć lapidarne przedstawienie proponowanego algorytmu oraz wyników badania jego dokładności. Zgodnie z przepisami takie podejście jest dopuszczalne. Bowiem możliwe jest przedstawienie rozprawy jako zbioru publikacji. W tym przypadku Doktorant wybrał rozwiązanie pośrednie. Artykuły podlegały wcześniejszej ocenie więc na ich podstawie nie można ocenić umiejętności poprawnego i przekonującego przedstawiania uzyskanych wyników. Można to jedynie uczynić na podstawie rozdziału 3 i 4. Zawartość tych rozdziałów pozwala mi stwierdzić, że Doktorant posiada umiejętność poprawnego i zwięzłego przedstawiania rezultatów swojej pracy.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Za słabą stronę przedstawionej do recenzji rozprawy uważam brak pogłębionej dyskusji niektórych założeń. Przykładem może tutaj być założenie o zachowaniu objętości ściany serca podczas jego skurczu (podrozdział 2.6.3, strona 45).

Znane jest zjawisko, polegające na tym, że żylny odpływ krwi z miokardium jest w przeciwfazie do napływu tętniczego, tzn. odpływ jest duży podczas skurczu, a mały podczas rozkurczu, podczas gdy napływ tętniczy jest duży podczas rozkurczu, a mały podczas skurczu. Takie przebiegi świadczą o tym, że objętość krwi w miokardium, podczas jednego cyklu pracy serca ulega zmianom. Wzrasta podczas rozkurczu i zmniejsza się podczas skurczu. Z punktu widzenia przedstawionego algorytmu można więc mówić co najmniej o dwóch aspektach tego zjawiska. Po pierwsze objętość mięśnia nie jest stała. Na ile więc założenie o zachowaniu objętości miokardium jest słuszne, biorąc pod uwagę że za obraz referencyjny przyjmuje się ten otrzymany w fazie rozkurczu? Po drugie zmienia się ilość wody w mięśniu i tym samym rejestrowany z jego obszaru sygnał. Jak według Doktoranta te zjawiska wpływają na dokładność wyznaczania zaproponowanego wskaźnika?

Czy założenie o powtarzalności skurczów serca w przypadku badania osób z dyssynchronią jest uzasadnione (każda warstwa jest pozyskiwana podczas osobnego, kolejnego wstrzymania oddechu). Co prawda Autor wskaźnik CDI konstruuje na podstawie jednej warstwy (bazowej), ale wówczas można postawić pytanie na ile zmiany w bazowej warstwie serca zawierają informację o mechanicznych zjawiskach zachodzących w pozostałych warstwach?

Istnieje wiele odmian dyssynchronii, a Autor skupia się jedynie na monitorowaniu lewej komory. Czy ten sposób monitorowania jest wystarczający dla wszystkich odmian dyssynchronii serca?

Rozprawa jest trudna do czytania, bowiem jej Autor wykorzystuje, moim zdaniem, nadmierną liczbę odwołań do literatury, zamiast przywoływać przedstawiane tam rezultaty, a przynajmniej przedstawić krótki ich opis. Oczywiście jest to uwaga dyskusyjna bowiem można oczekiwać od recenzenta, że rozważane w rozprawie zagadnienia są mu dokładnie znane.

Niemniej jednak wspomniana lapidarność opisu prowadzi, w nielicznych przypadkach, do niekonsekwencji w opisie. Np. odwołanie w podrozdziale 3.5.3. do opisu w podrozdziale 2.6.2. jest w pewnym stopniu mylące. W podrozdziale 3.5.3 rozważane jest zagadnienie 3D i nakładane są ograniczenia na operator transformacji, podczas gdy opis w podrozdziale 2.6.2. dotyczy zagadnienia 2D i regularyzacji przemieszczenia. Ale, jak rozumiem intencje Autora, odwołanie to dotyczy rodzaju (postaci) regularyzacji. Jeżeli potraktować odwołanie dosłownie to należy zwrócić

uwagę, że we wzorze (3.4) i (3.5)? jednocześnie znikła liczba  $\sqrt{2}$  w porównaniu do wzoru 2.43. Niedociągnięcia są b. nieliczne i nie wpływają na moją pozytywną ocenę rozprawy.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

O wadze problemu rozważanego w rozprawie świadczy fakt, że organizatorzy prestiżowych międzynarodowych konferencji (Medical Image Computation and Computer Assisted Intervention – MICCAI) decydują się na ogłoszenie wcześniej wspomnianych konkursów w celu opracowania efektywnych i dokładnych algorytmów pozwalających na śledzenia ruchu serca i w tym celu dostarczają odpowiednich danych.

Główna zaleta zaproponowanej metody to wykorzystanie danych pozyskiwanych w znany i „klasyczny” sposób do otrzymania dodatkowej informacji w postaci wskaźnika (ang. Cine Dyscontractility Index – CDI) mogącej istotnie wpłynąć na przebieg terapii. Nie bez znaczenia jest fakt, że ta dodatkowa informacja pozyskiwana jest w zdecydowanie krótszym czasie, przy jednoczesnym zachowaniu dokładności danych wykorzystywanych do obliczeń proponowanego wskaźnika, niż jest to możliwe za pomocą innych, znanych z literatury metod.

Opracowany algorytm należy uznać za „ułatwiający” prowadzenie badań klinicznych. Tym samym można się spodziewać, że pozwoli to na przeprowadzenie dodatkowych ocen stanu pacjentów kardiologicznych bez istotnego zwiększenia nakładu czasu. W rezultacie zostanie zebrany większy materiał kliniczny, obejmujący więcej złożonych przypadków, którego analiza przybliży nas do odpowiedzi choćby na pytanie, w jakich przypadkach terapia CRT jest obecnie nieskuteczna.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a. nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy
- b. wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania
- c. spełniająca wymagania
- d. spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem
- e. wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

Prace doktorską mgra Konrada Werysa zaliczam do kategorii spełniającej wymagania, stawiane przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003 Nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami), z wyraźnym nadmiarem.

Autor wykazał dobre przygotowanie merytoryczne, oraz umiejętność prowadzenia badań eksperymentalnych i analizy otrzymanych wyników. Silną stroną Doktoranta jest także umiejętność stosowania metod matematycznych i ich implementacja w postaci numerycznej.

Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzenia wnioskuję o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

  
Jerzy Wtorek

## Recenzja

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pana magistra inżyniera **Konrada Werysa** zatytułowana: "*Cardiac Motion Analysis Method Based on Cinematographic MRI*". Przedstawiona rozprawa została napisana pod kierownictwem pana profesora dr hab. inż. Piotra Bogorodzkiego na wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej w 2016 roku. Przewód doktorski jest prowadzony w dyscyplinie elektronika.

### 1. Zawartość rozprawy

Rozprawa składa się z wprowadzenia, trzech rozdziałów i podsumowania, a jej treść uzupełnia spis bibliograficzny, spisy rysunków i tabel oraz dwa dodatki będące kopiami artykułów opublikowanych w związku z badaniami autora przeprowadzonymi w ramach przewodu doktorskiego. Wstęp zawiera motywację badań naukowych prowadzonych przez Doktoranta oraz tezę. We wstępie zawarto także krótki przegląd zawartości rozprawy. Rozdział 2 poświęcony jest opisowi celu i zasad rejestracji obrazów medycznych oraz przeglądowi metod komputerowych używanych w rejestracji obrazów. Przegląd ten rozpoczyna się od opisu zagadnień ogólnych: dwóch odmiennych podejść do rejestracji, zawiera szczegóły techniczne jak opis miar dopasowania, optymalizacji procesu oraz rejestracji obrazów dynamicznych. W swej końcowej części opis istniejących metod dotyczy szczególnie obrazowania serca, co jest głównym polem osiągnięcia naukowego Doktoranta. Rozdział 3 zawiera opis autorskiego algorytmu rejestracji obrazów kardiologicznych wykorzystującego sekwencję CINE (ruchomych) obrazów uzyskanych metodą magnetycznego rezonansu jądrowego. Rozdział 4 stanowi walidację zaproponowanego algorytmu przeprowadzoną trójtorowo: za pomocą obrazów symulowanych, za pomocą obrazów ogólnie dostępnych przygotowanych jako referencyjne na potrzeby współzawodnictwa naukowego oraz za pomocą obrazów rzeczywistych uzyskanych od 52 pacjentów podczas nadzorowania terapii resynchronizacyjnej serca. W podsumowaniu Autor syntetycznie zestawia wyniki testów, potwierdza prawdziwość postawionej tezy (choć deklarowana submilimetrowa dokładność osiągnięta jest jedynie dla obrazów symulowanych), przedstawia oryginalne osiągnięcia naukowe i zarysowuje perspektywy dalszych badań.

Rozprawę uzupełniają pełne teksty dwóch artykułów, co jest nietypowe, ale było mi pomocne, gdyż znalazłem tam wiele szczegółów i rysunków przydatnych do zrozumienia treści rozprawy. Pewnym mankamentem jest fakt, że obie publikacje są wieloautorskie, co utrudnia ocenę wkładu Doktoranta nawet mimo że występuje On w obu jako pierwszy autor.

Podsumowując zawartość rozprawy stwierdzam, że Doktorant jasno i precyzyjnie zdefiniował zagadnienie naukowe poruszane w rozprawie, a następnie poprawnie ugruntował je teoretycznie oraz rozwiązał praktycznie i zweryfikował z użyciem metod należących do światowych standardów.

### 2. Znaczenie dokonań Autora dla rozwoju dyscypliny

Rozprawa doktorska autorstwa p. mgr Werysa jest poświęcona zagadnieniom istotnym z technicznego i medycznego punktu widzenia, a jego dokonania uważam za ważne. Bardzo dobrym pomysłem był podział rozprawy na część opisującą istniejący stan badań



(rozdział 3) oraz oryginalne autorskie osiągnięcia (rozdziały 4 i 5). W części pierwszej Autor w zwięzły, ale kompletny sposób wykazał się znajomością literatury światowej i bardzo trafnie uzasadnił podejmowane prace naukowe. To ważne wobec coraz częściej spotykanych doniesień wtórnych, których autorzy podejmują badania i wydają publiczne pieniądze bez zapoznania się ze stanem wiedzy, a zatem bez szans na jego wzbogacenie. W części drugiej Autor przekonująco wykazał, że rozwiązał postawione zagadnienia używając do tego odpowiednich metod matematycznych, programistycznych i eksperymentalnych. Warsztat naukowy Doktoranta oceniam bardzo wysoko, z podziękowań zawartych na wstępie rozprawy wnioskuję, że 'jadł chleb z niejednego pieca'. Obserwację tę potwierdza nadesłana na moją prośbę lista publikacji Doktoranta zawierająca – obok 18 wystąpień konferencyjnych – aż sześć publikacji w czasopiśmie z bazy JCR. To bardzo dobry dorobek osiągnięty głównie we współpracy ze świetnie publikującym zespołem radiologów, co nie umniejsza znaczenia dokonań Doktoranta, a wprost przeciwnie dokumentuje prowadzoną przez Niego owocną współpracę multidyscyplinarną. Do cennych elementów tego warsztatu zaliczam wspomniane już dogłębne studia literaturowe, precyzyjne wyprowadzenia teoretyczne proponowanej metody (choć nieco zbyt skrótowo przedstawione), oraz jej implementację i weryfikację numeryczną. Implementacja dla środowiska Matlab została udostępniona publicznie, a weryfikacja wykorzystuje m. in. publiczne repozytorium obrazów, co gwarantuje powtarzalność i transparentność prowadzonych badań. Przeprowadzone badania doprowadziły do wzbogacenia stanu wiedzy o oryginalne osiągnięcia Autora przedstawione w rozprawie. Moim zdaniem, to takich zaliczyć należy co najmniej **trzy** elementy istotnie oryginalne:

1. zaproponowanie i eksperymentalną implementację metody DIRAC umożliwiającej w pełni automatyczne wyznaczenie pola przesunięć na podstawie sekwencji obrazów CINE bez ingerencji w standardowo wykonywaną procedurę medyczną, metoda została zweryfikowana za pomocą danych symulowanych i rzeczywistych sekwencji referencyjnych,
2. zaproponowanie symulatora ruchu serca bazującego na rzeczywistych obrazach serca,
3. zaproponowanie parametru do predykcji odpowiedzi pacjenta na terapię resynchronizacyjną serca i przetestowanie go wraz z zespołem lekarzy.

Każde z wymienionych oryginalnych osiągnięć jest istotne i stanowi potencjalny punkt wyjścia do dalszych badań naukowych. Dotyczy to zarówno technicznych udoskonaleń i docelowej implementacji metody DIRAC w oprogramowaniu firmowym tomografów MRI, jak i medycznego wykorzystania nowych możliwości, jakie oferuje metoda.

### **3. Zagadnienia do dyskusji**

Doktorant podjął i rozwiązał ważny technicznie i medycznie problem naukowy i zrobił to w sposób odpowiadający standardom światowym. W rozprawie trudno jest znaleźć jakiegokolwiek mankamenty, ale wierząc, że Autor zechce kontynuować podjęty i bardzo perspektywiczny temat chciałbym sformułować kilka uwag dyskusyjnych, których rozważenie podczas przygotowania do obrony z pewnością pomoże Autorowi w planowaniu, przeprowadzaniu i raportowaniu Jego przyszłych prac. Proponuję aby Doktorant podczas publicznej obrony odniósł się do następujących problemów:

1. W metodzie DIRAC założono, że dowolny fragment tkanki może się przemieszczać dowolnie, wydaje się, że lepsze odwzorowanie przemieszczeń można osiągnąć identyfikując anatomiczne elementy przekroju i przypisując im fizjologicznie uzasadniony atrybut elastyczności,
2. Sposób przedstawienia działania metody DIRAC jest arbitralny i nie zawiera rozważań wariantowych. Czy elementy algorytmu (np. korekcja ruchu oddechowego, wstępna rejestracja obrazu sztywnego, rejestracja obrazu deformowalnego) są optymalne? Jakie rozwiązania alternatywne były rozważane i testowane i dlaczego okazały się gorsze?

3. Rozdział 4.2.1 zawiera jedynie skrótowy opis symulatora CMOS (przy okazji: to niefortunna nazwa) o arbitralnie ustawionych parametrach. Skąd wiadomo, że symulator generuje poprawne sekwencje? Należało to sprawdzić przed użyciem go w roli testera metody DIRAC (rozdz. 4.2.2), w przeciwnym razie wiarygodność walidacji jest dyskusyjna.
4. Czy metody UPF i INRIA zostały przez Autora zaimplementowane na podstawie doniesień ich autorów, czy Doktorant wykorzystał udostępnione kody do samodzielnej weryfikacji tych metod? Czy dane przedstawione na rys. 4.6 dotyczące tych metod zostały bezpośrednio zaczerpnięte z artykułów?
5. Sposób przedstawienia walidacji metody DIRAC zawiera jedynie podstawowe parametry statystyczne. To moim zdaniem daleko niewystarczające. Repozytorium referencyjne zawiera z pewnością sekwencje łatwiejsze i trudniejsze do automatycznej analizy i warto byłoby porównać zachowanie metod UPF, INRIA i DIRAC na konkretnych sekwencjach. Postępowanie takie jest od lat standardem np. w automatycznej interpretacji EKG – może to pomóc w identyfikacji źródeł niedokładności i ulepszeniu opracowywanej metody.
6. Na stronie 69 Autor opisuje rezultaty DIRAC 2D jako porównywalne z metodami UPF i INRIA (i takie wrażenie można odnieść z rys. 4.6), ale w podsumowaniu na stronie 75 pisze, że „*DIRAC 2D outperforms methods presented in literature*”. Na podstawie rozprawy można odnieść wrażenie, że wyższość metody DIRAC polega na braku ingerencji w procedurę medyczną (to ważne) i ew. niższej złożoności obliczeniowej (temat złożoności obliczeniowej został zresztą bardzo pobieżnie opisany).

#### **4. Aspekty formalne rozprawy**

Rozprawa jest napisana w j. angielskim i została przygotowana bardzo starannie. Poza kilkoma usterkami językowymi i - moim zdaniem – brakującymi rodzajnikami nie znalazłem błędów obniżających jej wartość. To istotna zaleta, gdyż, mimo poruszania dość trudnych zagadnień i zwartej formy wymagającej koncentracji czytelnika, rozprawę aż chce się czytać. Jedyna moja uwaga to może zbyt skromne przedstawienie rezultatów ilościowych. Macierze obrazów tomograficznych (np. rys. 3.6) mają niewątpliwy walor estetyczny, ale trudno opierać na nich opinię o jakości proponowanej metody.

#### **5. Wniosek końcowy**

Przedstawiona rozprawa stanowi istotne rozszerzenie stanu wiedzy w zakresie obrazowania i ekstrakcji parametrów serca w ruchu i jest istotnym wkładem w rozwój nauk technicznych, a szczególnie dyscypliny elektronika. Na uwagę zasługuje rozeznanie Doktoranta w zakresie nowoczesnych narzędzi obrazowania medycznego, oraz Jego biegłość w stosowaniu aparatu matematycznego i organizacji prac badawczych.

Przedstawiona rozprawa doktorska zatytułowana: "*Cardiac Motion Analysis Method Based on Cinematographic MRI*" spełnia wymagania Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym (z dnia 14 marca 2003 roku, Dziennik Ustaw Nr 65, poz. 595) w zakresie stopnia doktora nauk technicznych. Recenzent wnioskuję do Komisji o **dopuszczenie rozprawy doktorskiej p. mgr Konrada Werysa do publicznej obrony.**

