

Łódź, dn. 20 marca 2022 r.

dr hab. inż. **Anna Fabijańska**, prof. PŁ
Instytut Informatyki Stosowanej
Wydział Elektrotechniki, Elektroniki,
Informatyki i Automatyki
Politechnika Łódzka
Ul. Stefanowskiego 18
90-537 Łódź

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej **mgr inż. Iryny Gorbenko** na temat:

A Method for Automatic Soft Facial Tissue Measurement Using Magnetic Resonance Imaging Data

Promotor: prof. dr hab. inż. Krzysztof Kałużyński

Promotor pomocniczy: dr inż. Krzysztof Mikołajczyk

1. Podstawa sporządzenia recenzji

Niniejsza recenzja została sporządzona na prośbę Pana prof. dr hab. inż. Gerarda Cybulskiego - Dziekana Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej, wyrażoną w piśmie nr WMt.521.1.2022 z dnia 24 stycznia 2022 r. Recenzja została sporządzona na podstawie przedłożonego tekstu rozprawy.

2. Cel i zakres tematyczny rozprawy

Rozprawa doktorska **mgr inż. Iryny Gorbenko** podejmuje **ciekawy problem** bezinwazyjnego i bezkontaktowego pomiaru grubości tkanek miękkich twarzy. W szczególności, Autorka proponuje wykorzystanie metod przetwarzania i analizy obrazów do automatycznego wyznaczenia grubości tkanek miękkich w określonych punktach charakterystycznych głowy i twarzy, w oparciu o badanie obrazowe tomografii rezonansu magnetycznego MRI. Ten proces diagnostyczny nie został jeszcze w pełni zautomatyzowany. Większość istniejących metod pomiaru tkanek miękkich to metody *in vivo*, często inwazyjne lub co najmniej kontaktowe, jak np. badanie ultrasonograficzne. Dokładność wielu z nich zależy od doświadczenia i umiejętności operatora dokonującego pomiaru. Istnieje ograniczona liczba doniesień poświęconych automatycznemu pomiarowi grubości tkanek miękkich, w tym tkanek twarzy z wykorzystaniem metod obrazowych. Dlatego **problem podjęty w rozprawie uważam za aktualny i istotny**.

W celu automatyzacji pomiaru grubości tkanek miękkich twarzy na podstawie badania MRI, mgr inż. Iryna Gorbenko proponuje wykorzystać metody bazujące na dopasowaniu obrazów (ang. *image registration*). Ich zadaniem wg. pomysłu Doktorantki jest wyznaczenie położenia tych punktów charakterystycznych twarzy (antropometrycznych) i czaszki (kraniometrycznych), w których następnie dokonywany jest pomiar grubości tkanek.

Cel rozprawy jest zatem jasno zdefiniowany, podobnie jak jej zakres, który Autorka definiuje następująco (cyt. str. 33):

- *Review of available solutions and choice of the suitable method that would allow automatic identification of anthropometric and craniometric landmarks.*
- *Development of the algorithm of anthropometric and craniometric landmarks identification and soft tissue thickness measurement.*
- *Implementation of the developed soft tissue thickness measurement algorithm.*
- *Development of the algorithm of MRI head template creation.*
- *Optimization and validation of the parameters of the soft tissue thickness measurement algorithm and template creation algorithm.*
- *Preparation of the public database (selection and pre-processing of MRI data).*
- *Development, implementation, and validation of landmark position correction algorithms.*
- *Comparison of obtained experimental results with reference data available in the literature.*
- *Establishment of directions of future development and improvement of proposed soft tissue thickness measurement algorithm.*

Zakres tematyczny rozprawy, w szczególności fakt, że przedmiotem rozważań Autorki jest problem opracowania dedykowanych algorytmów przetwarzania i analizy obrazów biomedycznych, pozwala w mojej ocenie zakwalifikować rozprawę do **dyscypliny naukowej inżynieria biomedyczna**.

3. Układ rozprawy i zawartość poszczególnych rozdziałów

Recenzowana rozprawa napisana jest w języku angielskim. Obejmuje 133 strony maszynopisu podzielone na siedem numerowanych rozdziałów poprzedzonych podziękowaniami oraz streszczeniami w językach polskim i angielskim. Rozdziały 1-3 stanowią wprowadzenie do rozważanego w rozprawie problemu pomiaru grubości tkanek miękkich twarzy. Natomiast zasadnicza część rozprawy zawarta została w Rozdziałach 4-6, w których Doktorantka opisała autorskie rozwiązania oraz przedstawiła i przeanalizowała wyniki ich działania. Struktura i podział treści kolejnych rozdziałów w większości tworzą logiczną i spójną całość. Szczegółowa zawartość poszczególnych rozdziałów kształtuje się następująco:

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do rozważanego w rozprawie problemu pomiaru grubości tkanek miękkich głowy z wykorzystaniem punktów kraniometrycznych i antropometrycznych czaszki i twarzy. W szczególności wprowadza nomenklaturę związaną ww. punktami definiując ich położenie na twarzy i czaszce oraz przytacza podaną w literaturze grubość tkanek miękkich w wybranych punktach, stanowiącą punkt odniesienia do rozważań w praktycznej części rozprawy. Autorka dokonuje również przeglądu metod dedykowanych pomiarowi tkanek miękkich, podkreślając ich zalety i wady, zwracając jednocześnie uwagę na wyzwania wynikające z istnienia kilku szkół pomiaru oraz różnic pomiędzy różnymi grupami etnicznymi, płciami, czy zmianami grubości tkanki miękkiej z wiekiem i wagą. Rozdział kończy się wyjaśnieniem procesu nakładania (dopasowywania) obrazów (ang. *image registration*), które w ocenie recenzenta niezbyt pasuje do tego rozdziału.

Rozdział 2 definiuje cel oraz zakres rozprawy. Jest bardzo zwięzły i w ocenie recenzenta mógłby zostać włączony do rozdziału poprzedzającego.

Rozdział 3 opisuje zbiór badań obrazowych MRI głowy wykorzystanych w rozprawie, pochodzących z publicznej bazy danych IXI (ang. *Information eXtraction from Images*) z uwzględnieniem rozkładu rasy, płci, wieku oraz wskaźnika BMI osób, od których pozyskano badania MRI głowy. Nie jest jasne, dlaczego uwzględnione zostały wszystkie badania obrazowe, w sytuacji kiedy w rozprawie wykorzystano tylko część z nich (kobiety rasy kaukaskiej w wieku 18-29 lat i normalnym BMI). Autorka omawia również kolejne etapy przetwarzania wstępnego wykorzystanych danych.

Rozdział 4 rozpoczyna zasadniczą część rozprawy, opisując oryginalne rozwiązania Autorki. W szczególności, w pierwszej kolejności przedstawiony został ogólny zarys opracowanej metody pomiaru grubości tkanek miękkich głowy, a następnie szczegółowe opisy jej kolejnych kroków, w tym proces tworzenia fantomu i optymalizacji parametrów w tym procesie uwzględnionych, etap dopasowania fantomu i bieżącego obrazu oraz metody korekcji położenia wykrytych kraniometrycznych i antropometrycznych punktów charakterystycznych.

Rozdział 5 przedstawia analizę statystyczną otrzymanych wyników pomiaru grubości tkanek miękkich twarzy, z uwzględnieniem opisu zastosowanej metodologii, oraz oceny dokładności każdej z zaproponowanych metod korekcji położenia punktów charakterystycznych, zarówno w odniesieniu do poszczególnych punktów, jak również ich grup wynikających z lokalizacji w obszarze twarzy. W wyniku analizy, Autorka przedstawiła również rekomendacje dotyczące wyboru metody korekcji położenia poszczególnych punktów, jak również ich grup.

Rozdział 6 zawiera dyskusję otrzymanych wyników w odniesieniu do danych literaturowych. W szczególności, Autorka pośrednio porównała uzyskane wyniki pomiaru grubości tkanek miękkich w poszczególnych punktach charakterystycznych do wyników uzyskanych przez innych badaczy tradycyjnymi metodami. Wskazała również możliwe powody zaobserwowanych rozbieżności w odniesieniu do punktów zlokalizowanych w poszczególnych obszarach twarzy.

Rozprawę zamyka podsumowanie zawarte w **Rozdziale 7**.

Do pracy dołączony został również wykaz materiałów źródłowych obejmujący 71 pozycji literaturowych z lat 1883-2020 (w tym dwie pozycje współautorstwa Doktorantki) oraz osiem dodatków zawierających szczegółowe wyniki przeprowadzonych eksperymentów, w tym uzyskanych grubości tkanek miękkich twarzy mierzonych w poszczególnych punktach charakterystycznych.

Rozprawa napisana jest w większości poprawnym językiem, w sposób zasadniczo zrozumiały, ale nie zawsze jednoznaczny i precyzyjny. Jej zawartość wskazuje, że **Autorka posiada wiedzę teoretyczną** z zakresu wykorzystanych w rozprawie metod przetwarzania i analizy obrazów, oraz narzędzi do statystycznej oceny wyników, jak również **ogólną wiedzę na odpowiednim poziomie z zakresu nauk inżynierjno-technicznych i dyscypliny pracy**.

4. Oryginalny wkład Doktorantki

Oryginalnym osiągnięciem naukowym mgr inż. **Iryny Gorbenko** przedstawionym w recenzowanej rozprawie jest **metoda automatycznego wyznaczania grubości tkanek miękkich twarzy na podstawie obrazów MRI**. Bazuje ona pomiarze odległości euklidesowej pomiędzy odpowiadającymi sobie punktami charakterystycznymi znajdującymi się na powierzchni twarzy (punkty antropometryczne) oraz czaszki (punkty kraniometryczne).

W celu znalezienia ww. par punktów charakterystycznych w badaniu MRI głowy Doktorantka zaproponowała wykorzystanie techniki dopasowania obrazów (ang. *image registration*). Idea autorskiej metody polega na znalezieniu lokalizacji punktów

charakterystycznych w obszarze twarzy i czaszki w wyniku przeniesienia ich ze wzorca (fantomu). W szczególności, lokalizacja punktów charakterystycznych odbywa się w drodze elastycznego dopasowania obrazu MRI poddawanego analizie (który w metodzie Doktorantki pełni rolę tzw. *moving image*), do wzorca (który pełni rolę tzw. *fixed image*) z zaznaczonymi przez eksperta punktami charakterystycznymi. Dopasowanie realizowane jest z uwzględnieniem intensywności obu obrazów, a jako miara dokładności dopasowania wykorzystywana jest informacja wzajemna (ang. *mutual information*). W wyniku dopasowania, punkty charakterystyczne przenoszone są ze wzorca na aktualny obraz MRI.

Dla potrzeb powyższej procedury, Doktorantka **zapropowała również metodę przygotowania obrazu wzorcowego (fantomu)**, w dwóch wariantach tj. (i) w wyniku sukcesywnego nakładania i uśredniania kolejnych badań MRI oraz (ii) poprzez jednokrotne uśrednienie kilku obrazów dopasowanych do obrazu bazowego. Zbadała również, czy i w jakim stopniu na jakość przygotowanego wzorca wpływają: zastosowanie filtracji uśredniającej Gaussa, częstotliwość próbkowania, korekta niejednorodnego rozkładu jasności, liczba obrazów MRI wykorzystanych do przygotowania fantomu oraz wskaźnik masy ciała pacjentów od których pozyskano badania (ang. *Body Mass Index*, BMI). Wyniki powyższej analizy pozwoliły na **optymalizację parametrów procesu tworzenia wzorca**.

Ponieważ dopasowanie punktów charakterystycznych w fantomie oraz przetwarzanym obrazie MRI głowy nie zawsze przebiega idealnie, Doktorantka **zapropowała również pięć metod korekty położenia wykrytych punktów** do zastosowania opcjonalnie (na podstawie wizualnej inspekcji) na etapie przetwarzania końcowego, przed dokonaniem pomiaru grubości tkanki. Metody te zasadniczo można podzielić na dwie grupy. Metody należące do pierwszej z nich dokonują analizy profilu jasności obrazu w kierunku łączącym odpowiadające sobie punkty kraniometryczne oraz antropometryczne. Każda z połówek profilu jasności analizowana jest oddzielnie odpowiadając typom punktów charakterystycznych. W szczególności, nowe położenie punktu może zostać wyznaczone przez (i) lokalizację ekstremów pierwszej pochodnej profilu jasności, (ii) lokalizację odpowiadającą położeniu wartości jasności wyznaczonej metodą Otsu, (iii) lokalizację odpowiadającą jasności wyznaczonej empirycznie na podstawie analizy rozkładu jasności wokół ręcznie wyznaczonych punktów charakterystycznych, (iv) w sposób hybrydowy. Alternatywne podejście zaproponowane przez Doktorantkę bazuje na wykorzystaniu obrazu binarnego stanowiącego maskę tkanek miękkich głowy. W szczególności skorygowaną lokalizację punktów charakterystycznych wyznaczają miejsca przejścia tło-tkanka miękka i tkanka miękka-tło.

Weryfikację dokładności opracowanej metody pomiaru grubości tkanek miękkich, z uwzględnieniem analizy wpływu zaproponowanych metod korekcji położenia punktów charakterystycznych Doktorantka przeprowadziła z wykorzystaniem 18 badań obrazowych MRI pochodzących z publicznej bazy danych IXI (ang. *Information eXtraction from Images*) przedstawiających głowy kobiet rasy kaukaskiej, w wieku 18-29 lat oraz wskaźniku BMI z zakresu 20-25 kg/m³. Każdorazowo, pomiaru grubości dokonała w 23 punktach charakterystycznych. Uzyskane wyniki odniosła (pośrednio) do wyników przedstawionych w literaturze i uzyskanych z wykorzystaniem badania ultrasonograficznego.

Ww. eksperymenty wykazały zgodność (lub uzasadnioną rozbieżność) autorskiego podejścia Doktorantki z wynikami uzyskanymi przez innych badaczy. To w mojej ocenie potwierdza, że **cel rozprawy został osiągnięty**.

5. Uwagi o charakterze krytycznym i polemicznym

Lektura recenzowanej rozprawy nasuwa także pewne uwagi o charakterze krytycznym oraz polemicznym, wskazanych poniżej. Cześć z nw. uwag stanowi podstawę do dyskusji podczas publicznej obrony.

- A. Autorka w ocenie recenzenta słabo umotywowała zasadność, istotność oraz aktualność podejmowanego w rozprawie problemu automatycznego pomiaru grubości tkanek miękkich twarzy. Jedynie zdawkowo wspomina, że Jej prace mogą mieć znaczenie w kryminalistyce oraz w chirurgii plastycznej. Z korzyścią dla rozprawy byłoby wskazanie bardziej konkretnych, potencjalnych zastosowań rozwiązań przedstawionych w rozprawie oraz podkreślenie wyzwań związanych z automatycznym pomiarem grubości tkanek.
- B. Pośród ok. 70 pozycji literaturowych zawartych w bibliografii, jedynie dziesięć stanowią prace opublikowane w ciągu ostatniej dekady. Pozostałe prace pochodzą z wcześniejszego okresu. Autorka skupiła się głównie na pozycjach dotyczących tradycyjnych (nie obrazowych) metod pomiaru grubości tkanek miękkich oraz wynikach tych pomiarów. Pomięła jednak prace związane chociażby z automatycznym wykrywaniem punktów charakterystycznych twarzy i czaszki (choć ich przegląd wskazany został jako jeden z celów rozprawy), czy dopasowywaniem obrazów, w tym z wykorzystaniem dopasowywania punktów charakterystycznych (ang. *landmark based image registration*). Badania takie prowadzone były również w odniesieniu do głowy. Odniesienia do prac o powyższej tematyce (zarówno w kontekście ich wskazania w stanie wiedzy, jak również ilościowego odniesienia na etapie oceny dokładności zaproponowanych metod), zdecydowanie lepiej osadziłyby rozprawę w aktualnym stanie wiedzy, oraz uzasadniły indywidualny wkład Autorki w rozwiązanie problemu.
- C. W kontekście powyższej uwagi, ciekawe byłoby porównanie dokładności zaproponowanej przez Autorkę metody dopasowywania obrazów przeprowadzonego na podstawie intensywności połączonego z korekcją położenia punktów charakterystycznych, z podejściem bazującym na dopasowywaniu obrazów na podstawie punktów charakterystycznych (ang. *landmark based image registration*). Implementację tego ostatniego podejścia dostarcza chociażby popularny pakiet Elastix.
- D. W Rozdziale 4 rozprawy Autorka wskazała dwa podejścia do tworzenia wzorca głowy, tj. w wyniku sukcesywnego nakładania i uśredniania kolejnych badań MRI oraz poprzez jednokrotne uśrednienie kilku dopasowanych do siebie obrazów. Nie jest jednak jasne, którą z zaproponowanych metod Autorka ostatecznie wykorzystwała podczas sprawdzania wpływu wybranych parametrów na jakość przygotowania wzorca oraz do przeprowadzenia eksperymentów opisanych w rozprawie.
- E. Proces oceny jakości przygotowanego fantomu oraz jej zależności od wybranych parametrów nie jest jasny. Autorka wskazuje (s. 47) „*Templates assessment was executed based on a comparison of its binary mask with binary masks of MRI images registered to this template. Each mask of the registered MRI images was compared with the template mask (...)*”. Co należy rozumieć przez „*MRI images registered to this template*”? Autorka nie definiuje, czy chodzi o obrazy MRI wykorzystane do utworzenia fantomu, czy obrazy MRI niewykorzystane w procesie tworzenia fantomu. Autorka wspomina o „*grupie testowej*”, ale nie definiuje tego pojęcia. Nie wskazuje również, ile było obrazów składowych oraz jak wyznaczono finalne miary jakości ich dopasowania. Mam także wątpliwość, czy odniesienie wyniku rejestracji do

wzorca o nieznannej jakości pozwala wnioskować o jakości wzorca. Z opisu przedstawionego w rozprawie wnioskuję, że takie właśnie podejście zastosowała Autorka.

- F. Ocena dokładności dopasowania punktów charakterystycznych w badaniu MRI i fantomie wykonana została w odniesieniu do punktów charakterystycznych wskazanych manualnie przez eksperta. Jak sama Autorka zauważa w tekście, dokładność takiego wzorca zależy od umiejętności, doświadczenia oraz subiektywnej oceny eksperta. Dlatego, dla rzetelnej oceny dokładności opracowanych metod wyznaczania położenia punktów charakterystycznych, wskazane byłoby wykorzystanie ich wzorcowych lokalizacji wskazanych przez co najmniej dwóch niezależnych ekspertów, oraz zbadanie, zgodności ekspertów ze sobą w odniesieniu do zgodności wyniku automatycznego pomiaru z każdym z ekspertów osobno.
- G. Ostatnim etapem tworzenia wzorca (fantomu) jest utworzenie binarnej maski odpowiadającej obszarowi głowy. Z tekstu rozprawy nie wynika jednoznacznie, w jaki sposób maska jest wykorzystywana w późniejszym etapie. Rejestracja obrazu MRI i wzorca zdaje się odbywać w oparciu o intensywność pikseli, bez wykorzystania maski. Potencjalnie, po znalezieniu transformacji wpasowującej obraz MRI w przestrzeń fantomu, tą samą transformację można by przyłożyć do binarnej maski, np. w celu przeniesienia punktów charakterystycznych na niej zdefiniowanych (co sugeruje Rys. 4.4). Rozprawa nie precyzuje jednak szczegółów tego etapu. W szczególności, z tekstu rozprawy nie wynika jednoznacznie, w jaki sposób dokonano przeniesienia punktów charakterystycznych z fantomu na obraz wynikowy.
- H. Działanie hybrydowej metody korekty położenia punktów charakterystycznych nie jest jasne. W szczególności, z tekstu rozprawy nie wynika jednoznacznie, w jaki sposób podejście bazujące na wyborze progów metodą Otsu oraz empiryczny wybór wartości progowej zostały połączone w podejście hybrydowe.
- I. W odniesieniu do metody korekty położenia punktów charakterystycznych, bazującej na empirycznie wyznaczonych wartościach progowych – czy wartości te mogą zostać uznane za uniwersalne, tj. obowiązujące również dla badań obrazowych uzyskanych za pomocą dowolnego urządzenia MRI?
- J. Jako jeden z celów rozprawy Autorka wskazuje przygotowanie publicznej bazy danych (s. 33, cyt. „*preparation of the public database*”) – jak zrealizowano ten krok?
- K. Uzasadniając podjęcie tematu, Autorka wskazuje na potrzebę przyspieszenia procesu pomiaru grubości tkanek miękkich w stosunku do istniejących rozwiązań. W treści rozprawy nie porusza jednak kwestii związanych z zasobami obliczeniowymi (w tym czasem) potrzebnymi do wykonania pomiaru grubości tkanek miękkich z wykorzystaniem proponowanej metody. Jak zatem kształtują się czas i pamięć potrzebne wykonania pomiaru? Jest to szczególnie istotne biorąc pod uwagę, że metody dopasowywania obrazów są zazwyczaj dość kosztowne obliczeniowo.

6. Strona edytorska rozprawy

Rozprawa jest w większości przygotowana starannie od strony edytorskiej, chociaż w tekście występują drobne błędy językowe. Sposób prezentacji danych oraz wyników jest czytelny i zasadniczo nie wzbudza zastrzeżeń, chociaż nagłówki niektórych tabel (np. Tab. 4.18 oraz 4.19) mogłyby być bardziej precyzyjne. Ilustracja graficzna jest obszerna i właściwie dobrana do treści. Jakość ilustracji jest w zdecydowanej większości odpowiednia.

7. Dorobek naukowy Doktorantki

W bazie Scopus zaindeksowane zostały łącznie trzy współautorskie publikacji Pani mgr inż. Iryny Gorbenko 2014-2020 związane bezpośrednio z tematyką rozprawy doktorskiej. Wśród nich jest jeden artykuł w czasopiśmie *Biomedical Signal Processing and Control* uwzględnionym w JCR (IF = 3.880, 140 pkt. MEiN) i zakwalifikowanym do dyscypliny naukowej inżynieria biomedyczna, w której prowadzony jest przewód doktorski Autorki, oraz dwa pokonferencyjne rozdziały wydane w serii *Advances in Intelligent Systems and Computing* wydawnictwa Springer. We wszystkich tych publikacjach mgr inż. Iryna Gorbenko jest pierwszą autorką. Oceniam, że jest to dorobek przeciętny - typowy na tym etapie kariery naukowej.

8. Podsumowanie

Pomimo uwag krytycznych uważam, że **rozprawa doktorska Pani mgr inż. Iryny Gorbenko stanowi interesujący wkład** w rozwój metod automatycznego i bezinwazyjnego wyznaczania grubości tkanek miękkich. Zaproponowana w rozprawie metoda pomiaru przeprowadzanego na podstawie badania obrazowego MRI głowy **stanowi oryginalne rozwiązanie** zdefiniowanego w rozprawie **problemu naukowego**. Wyniki eksperymentów potwierdzają poprawność opracowanej metody oraz wskazują na jej potencjał aplikacyjny. W mojej ocenie, metoda jest uniwersalna i może z powodzeniem zostać adaptowana do pomiaru grubości tkanek miękkich w obszarach innych, niż głowa.

W celu rozwiązania problemu będącego przedmiotem rozprawy, jej Autorka zastosowała właściwe metody badawcze oraz wykazała umiejętność prawidłowego planowania i realizacji badań, analizy uzyskanych wyników eksperymentalnych i formułowania wniosków. **Potwierdziła tym samym umiejętność samodzielnego planowania i prowadzenia badań naukowych.**

W związku z powyższym oceniam, że **rozprawa doktorska mgr inż. Iryny Gorbenko spełnia wymagania** określone w art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z dnia 20 czerwca 2016 r., poz. 882). Zatem, w związku z art. 179 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz.1669, z późn. zm.) **wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej Autorki do publicznej obrony.**

