Warszawa, 27.03.2019 r.

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Pałko
Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej
Politechniki Warszawskiej
ul. Św. A. Boboli 8
02-525 Warszawa

adres prywatny:
Gorlicka 15 A m. 10
02-130 Warszawa

WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY
DZIEKANAT
Wpł. 08 -04- 2019
DZIEKAN
Wydziału Elektrycznego
Politechniki Poznańskiej
prof. dr hab. inż. Zbigniew Nadolny

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Zuzanny Domagały
pt. **„Wspomaganie obrazowej oceny ryzyka pęknięcia tętniaka aorty brzusznej"**
promotor prof. dr hab. inż. Paweł Drapikowski

Niniejsza recenzja została opracowana, w związku z powołaniem mnie na recenzenta tej rozprawy przez Radę Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej na posiedzeniu w dniu 22 stycznia 2019 r. oraz zgodnie pismem z dnia 28.01.2019 r. w tej sprawie.

Choroby układu krążenia wciąż są, zarówno w Polsce jak i na świecie, najczęstszą przyczyną zgonów (sięgającą około 50% ogółu). Należy też podkreślić, że tętniaki aorty brzusznej należą do częstych przyczyn zgonu osób powyżej 65 roku życia. Z tego też względu wczesne wykrycie tego schorzenia oraz ocena stopnia zagrożenia życia, spowodowanego istnieniem tej choroby, jest niezwykle istotna. Wynika to z potrzeby kwalifikacji do zabiegu chirurgicznego lub tylko do monitorowania rozwoju choroby, jeśli zagrożenie pęknięcia tętniaka jest małe. Z przeglądu literatury wynika, że obecnie stosowane główne kryterium oceny stopnia zagrożenia pęknięcia tętniaka (i w konsekwencji utraty życia) opiera się na podstawie obrazowania rentgenowskiego lub ultradźwiękowego i oceny wymiaru maksymalnego średnicy tętniaka. Jeśli jego wymiar przekracza 55 mm, to uważa się, że istnieje realne ryzyko pęknięcia tętniaka. Prowadzone badania i obserwacje kliniczne wykazały jednak, że w wielu przypadkach tętniaki o mniejszej średnicy od 55 mm ulegają również pęknięciu. Dla odmiany, tętniaki o rozmiarze 55 mm i większe okazują się niekiedy stabilne przez wiele lat, aż do naturalnej śmierci chorego. Z tego wynika, że kryteria oceny zagrożenia powinny być rozszerzone, co wymaga dalszych badań z tego zakresu.

W powyżej wymieniony zakres potrzeb, dobrze wpisuje się przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Zuzanny Domagały pt. „Wspomaganie obrazowej oceny ryzyka pęknięcia tętniaka aorty brzusznej", której promotorem jest prof. dr hab. inż. Paweł

Drapikowski. Rozprawa została poświęcona zagadnieniu komputerowego modelowania i symulacji właściwości mechanicznych, zwłaszcza wytrzymałościowych, tętniaka aorty brzusznej, jako spersonizowanej metody predykcji zagrożenia pęknięcia tego rodzaju tętniaka. Zatem tematyka recenzowanej pracy dobrze wpisuje się w oczekiwany przez naukę i praktykę medyczną obszar badawczy, mający na celu eliminację lub zmniejszenie dotychczasowych niedostatków diagnostyki tętniaków aorty. Tematyka rozprawy jest bardzo ważna, zarówno z punktu widzenia poznawczego, dydaktycznego, jak i przede wszystkim utylitarnego. Dobrze nadaje się do zastosowania w medycynie, do diagnostyki i oceny predykcji ryzyka pęknięcia tętniaków aorty brzusznej. Praca ma charakter innowacyjny (autorskie opracowanie numerycznego modelu struktury wytrzymałościowej aorty z tętniakiem i jego weryfikacja doświadczalno-kliniczna). Zakres pracy oceniam jako wystarczający, a nawet przekraczający wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Głównym celem rozprawy było opracowanie metodologii przetwarzania danych obrazowych aorty brzusznej i jej tętniaka w oparciu o bramkowaną metodę magnetyczno-rezonansową obrazowania (MRI) struktur tkankowych badanego naczynia z tętniakiem przy rozkurczowym i skurczowym ciśnieniu krwi i przyjętym modelu materiałowym aorty tętniaka dla potrzeb wspomagania zindywidualizowanej diagnostyki. Warto wspomnieć, że przyjęty model materiałowy został oparty na metodzie elementów skończonych (MES). Sformułowano również trzy cele szczegółowe, które można traktować jako przyjęte zadania naukowo-badawcze. Są one następujące:

1. Opracowanie strumienia przetwarzania danych od momentu rejestracji obrazów MRI aorty lub tętniaka poprzez rekonstrukcję 3D do porównania wyników analizy numerycznej z geometrią referencyjną

2. Opracowanie i implementacja metod rekonstrukcji 3D modelu aorty i jej tętniaka na podstawie obrazów MRI

3. Eksperymentalna analiza istniejących modeli geometrycznych i materiałowych, wykorzystywanych do symulacji zachowania się aorty brzusznej i jej tętniaka

W niniejszej rozprawie przyjęta główna teza badawcza jest następująca: **Wykorzystanie bramkowanego obrazowania MRI, metod przetwarzania obrazu oraz symulacji numerycznych, pozwala na weryfikację poprawności założeń modelowania aorty brzusznej lub jego tętniaka, a zatem wspomaga zindywidualizowaną, nieinwazyjną diagnostykę.** Należy zaznaczyć, że zarówno przyjęte cele, jak i teza rozprawy, są bardzo ważne od strony poznawczej, a także praktycznej dla obecnie pilnych potrzeb medycyny, w szczególności dla kardiologii i angiologii.

Niniejsza rozprawa została starannie opracowana , zarówno pod względem edytorskim, jak i merytorycznym. Objętościowo jest dość obszerna, zawiera 116 stron, w tym 44 rysunków i 20 tabel oraz obszerną dobrze dobraną bibliografię (161 pozycji). Składa się ona z 6 rozdziałów i posiada przejrzystą oraz logiczną strukturę. We wprowadzeniu (Rozdz.1) zawarto przekonywującą motywacje podjęcia badań w zaproponowanej tematyce, jako narastającego problemu medycznego, a także podano cel i zakres pracy. Po dobrym przedstawieniu medycznych i technicznych podstaw rozprawy (Rozdz.2) dotyczących anatomii i właściwości mechanicznych aorty brzusznej oraz najczęściej używanych tomograficznych technik obrazowania struktur tkankowych i metod segmentacji tętniaka aorty brzusznej, a także metody elementów skończonych do analizy właściwości materiałowo-wytrzymałościowych złożonych obiektów w odpowiedzi na wymuszenie siłowo-odkształceniowe, przedstawiono komputerową metodę analizy wytrzymałościowej tętniaka aorty brzusznej (Rozdz.3) dla różnych modeli materiałowych (elastyczno-izotropowy, hiperelestyczny izotropowy oraz hiperelastyczny anizotropowy) z uwzględnieniem również modelu skrzepliny oraz zwapnienia. W następnych trzech rozdziałach (Rozdz.4-6) dobrze opisano przeprowadzone badania własne i uzyskane wyniki, na podstawie których potwierdzono spełnienie zaplanowanych celów oraz udowodniono prawdziwość przyjętej tezy tej rozprawy. Przedstawiony w tych rozdziałach materiał badawczy (7 zdrowych osób z fizjologiczną aortą i 11 pacjentów z potwierdzonym tętniakiem aorty) oraz przyjęte i zastosowane metody badań (Rozdz.4) zawierają metodę weryfikacji rozpatrywanych modeli, dane eksperymentalne, rekonstrukcje 3D, w tym półautomatyczną metodę segmentacji konturów, autorską metodę filtracji konturów i interpolacji warstw oraz próbkowanie konturów i triangulację. Następnie (Rozdz.5) omówiono wyniki badań dla różnych modeli materiałowych aorty i tętniaka (modele: elastyczne, hiperelastyczne izotropowe i hiperelastyczne anizotropowe). W końcowej części rozprawy (Rozdz.6) przeprowadzono dobrą dyskusję wyników oraz przedstawiono prawidłowe wnioski wynikające z tej dyskusji.

Do szczególnie wartościowych i w dużej mierze oryginalnych osiągnieć Doktorantki należy zaliczyć następujące opracowania:

1. Półautomatyczną segmentację skanów aorty i tętniaka uzyskanych techniką MRI wykorzystującą model aktywnych konturów
2. Autorską metodę filtracji segmentowanych konturów i rekonstrukcji 3D tętniaka aorty brzusznej
3. Oszacowanie kształtu tętniaka przy zerowym ciśnieniu transmuralnym (prestressing) z numeryczną symulacją błędu

W trakcie czytania i analizy tekstu rozprawy dostrzeżono kilka drobnych, mało znaczących nieścisłości np.:

- str. 1, w 6-7 d : obrazowanie warstwowe tkanek aorty, oparte na magnetycznym rezonansie jądrowym nazywanie powszechnie przez lekarzy jako: „tomografia rezonansu magnetycznego", jest nieścisłym określeniem (skrót myślowy), gdyż występuje tu tomografia struktur tkankowych oparta na zjawisku magnetycznego rezonansu jądrowego (relaksacja), a nie tomografia rezonansu magnetycznego.
- str. 90, w 8 g : użyto słowa „wagi" w odniesieniu do cechy indywidualnej człowieka, a poprawniej należałoby użyć pojęcia masy człowieka, gdyż w technice waga oznacza przyrząd do mierzenia masy, a nie wartość masy.

Poza tymi mało znaczącymi uwagami dla merytorycznej wartości pracy, rozprawę oceniam jako bardzo dobrą. Opracowana i przedstawiona w rozprawie metoda badania tętniaków ma kluczowe znaczenie dla spersonalizowanej diagnostyki aorty brzusznej. Metoda ta jest nieinwazyjna i ma cechy nowatorskie. Opiera się na bramkowanym obrazowaniu warstwowym poprzecznych segmentów brzucha w wybranych fazach cyklu czynności serca (skurcz i rozkurcz) wraz z pomiarem wartości tętniczego ciśnienia krwi w wybranych fazach cyklu czynności serca. Metoda ta umożliwia oszacowanie parametrów geometrycznych i materiałowych spersonalizowanego modelu cyfrowego badanego tętniaka bez naruszania ciągłości struktur tkankowych. Tak powstałe modele do wyznaczania naprężeń panujących w tętniaku umożliwiają predykcje ryzyka i potencjalnego miejsca pęknięcia tętniaka. Również ważnym osiągnięciem Doktorantki jest eksperymentalno-kliniczne potwierdzenie poprawności działania opracowanej metody modelowania i oceny tętniaków. Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że najkorzystniejsze wyniki, przy stosunkowo małej potrzebnej mocy obliczeniowej i dobrej dokładności uzyskano zarówno dla aort fizjologicznych jak i z tętniakiem przy użyciu materiałów hiperelastycznych o charakterze izotropowym. Komplikowanie modeli z użyciem materiałów hiperelastycznych o charakterze anizotropowym komplikuje modelowanie i powiększa błędy pomiarowe oraz wymaga wyraźnie większej mocy obliczeniowej i z tego względu w obecnej chwili jest nieuzasadnione. Opracowana metoda stwarza perspektywę dalszego jej doskonalenia i upowszechnienia w diagnostyce tętniaków aorty.

Reasumując, uważam, że mgr inż. Zuzanna Domagała w przedstawionej rozprawie doktorskiej rozwiązała samodzielnie postawione zadanie naukowe i wykazała się wiedzą i

umiejętnościami wymaganymi dla uzyskania stopnia nauk technicznych w dyscyplinie naukowej Automatyka i Robotyka. Rozprawa doktorska mgr inż. Zuzanny Domagały spełnia obowiązujące warunki ustawowe i w związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie w/w. Doktorantki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Jednocześnie w związku z osiągnięciem oryginalnych i wartościowych wyników pracy, przy opracowaniu i eksperymentalnych badaniach nowatorskiej metody numerycznej wspomagania oceny ryzyka i miejsca pęknięcia tętniaka aorty brzusznej oraz uwzględniając fakt, że część wyników z tego zakresu została opublikowana w anglojęzycznym artykule, stawiam wniosek o wyróżnienie niniejszej rozprawy doktorskiej.

Tadeusz Palko

prof.dr hab.inż.Tadeusz Palko