

Kraków, 9.02.2025 r.

prof. dr hab. inż. Paweł Octoń
Katedra Energetyki,
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki,
Politechnika Krakowska

Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł: The noninvasive technique of determining local stiffness of human arteries

Autor: mgr inż. Mateusz Mesek

Promotor: dr hab. inż. Ziemowit Ostrowski, prof. PŚI

1. Zakres i cel rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska składa się z ośmiu rozdziałów. Liczy 114 stron. Rozeznanie literaturowe liczy 97 pozycji. Głównym celem przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej jest opracowanie nieinwazyjnej metody obliczeń modułu Younga lewej tętnicy szyjnej wspólnej (LCCA) przy użyciu ultradźwiękowych pomiarów przemieszczenia ściany tętnicy i tonometrii aplanacyjnej do pomiaru ciśnienia wewnątrz tętniczego. Konfiguracja eksperymentalna, analiza danych i obliczenia zostały przeprowadzone przy użyciu systemu "ENTHRAL Non-invasive In Vivo Assessment of Stiffness of Human Artery Walls". Badania te były wspierane przez fundusze norweskie: UMO-2019/34/H/ST8/00624. Badania zostały przeprowadzone w ramach współpracy między Politechniką Śląską a Norweskim Uniwersytetem Nauki i Technologii.

Aby osiągnąć cel pracy, skonstruowano stanowisko badawcze składające się z fantomu tętnicy, pompy pulsacyjnej i urządzeń pomiarowych do zbierania danych dotyczących przepływu, ciśnienia i przemieszczenia ściany fantomu. Opracowano numeryczny model eksperymentu i zweryfikowano go w porównaniu z danymi pomiarowymi. Model ten został następnie zastosowany do rozwiązania problemu odwrotnego - oszacowania sztywności, zdefiniowanej jako moduł Younga, materiału użytego jako podłoże dla rzeczywistej tętnicy. Wybór prawa konstytutywnego był ograniczony liczbą parametrów do oszacowania, co doprowadziło do rozważenia tylko dwóch modeli: liniowego sprężystego

i Neo-Hookeana (materiał hipersprężysty). Model matematyczny został rozwiązany za pomocą Metody Elementów Skończonych przy użyciu otwartego oprogramowania FEBio. Na podstawie danych z eksperymentu wybrano najlepiej działający model i połączono go z rozszerzonym filtrem Kalmana w celu rozwiązania problemu odwrotnego. Podejście to, wraz z wybranym prawem konstytutywnym, zostało następnie zastosowane do danych pacjenta, co jest bardzo ważne dla praktycznych zastosowań.

2. Omówienie rozdziałów pracy doktorskiej

Praca została podzielona na osiem rozdziałów.

Rozdział 1 zawiera przegląd literatury na temat istniejących technik nieinwazyjnych metod estymacji i analizuje rozwiązania problemu odwrotnego. Doktorant przeprowadził kompleksowy przegląd literatury, identyfikując 18 artykułów dotyczących zastosowania filtrów Kalmana w badaniach nad tętnicami, pochodzących z baz: ScienceDirect, Web of Science i Scopus. Przegląd literatury jest dokładny, jednak brakuje w nim podsumowania wyjaśniającego nowatorstwo ocenianej pracy doktorskiej w stosunku do recenzowanych artykułów. Takie podsumowanie powinno się znaleźć na stronie 17 w monografii.

Rozdział 2 wprowadza kluczowe pojęcia w mechanice ośrodków ciągłych, niezbędne do sformułowania modeli konstytutywnych dla materiałów liniowo sprężystych i hipersprężystych. Omówiono w nim również zagadnienia odwrotne, typowe techniki ich rozwiązywania oraz algorytmy filtracji Kalmana. Rozdział ten szczegółowo omawia teorię liniowych i rozszerzonych filtrów Kalmana do estymacji stanu, a także techniki estymacji parametrów, w tym rozszerzony filtr Kalmana i jednoczesną estymację stanu i parametrów (podwójny rozszerzony filtr Kalmana). Jednak moim zdaniem, w tej sekcji powinno się również znaleźć podsumowanie zalet i ograniczeń przedstawionych algorytmów filtracji danych.

Rozdział 3 przedstawia stanowisko badawcze zaprojektowane do zbierania danych w celu opracowania i przetestowania nieinwazyjnych metod oceny tętnicy szyjnej wspólnej. Zawiera on szczegółowe wyjaśnienie systemu pomiarowego, przetwarzania obrazu z kamery, przetwarzania obrazu ultrasonograficznego i próbkowania danych medycznych. Chociaż rozdział ten jest wyczerpujący, brakuje w nim informacji na temat dokładności pomiarów (np. przepływu, ciśnienia, przemieszczeń i przetwarzania obrazu z kamery).

Rozdział 4 przedstawia analizę wrażliwości obliczeń MES porównującą statyczną i dynamiczną Metodę Elementów Skończonych (MES). Obliczenia wykonano z wykorzystaniem dwóch siatek numerycznych, z 1440 węzłami i 3696 węzłami, wykazując jedynie niewielkie różnice w wynikach dla przemieszczeń. W rozdziale szczegółowo opisano geometrię, właściwości mechaniczne i algorytm wykorzystywany do przetwarzania danych. Różnice między statyczną i dynamiczną metodą elementów skończonych dla modeli liniowo sprężystych i Neo-Hookeana były nieznaczne. Natomiast uważam, że zabrakło uzasadnienia wyboru tylko dwóch siatek numerycznych do walidacji obliczeń oraz uzasadnienia przyczyn niewielkich różnic pomiędzy wynikami statycznych i dynamicznych obliczeń MES.

Rozdział 5 koncentruje się na walidacji modelu numerycznego, porównując wyniki symulacji dla modeli liniowo sprężystych i Neo-Hookean z danymi eksperymentalnymi w celu wybrania najbardziej odpowiedniego modelu do dalszej analizy. Model Neo-Hookean został zidentyfikowany jako najlepiej dopasowany, dając najniższy średni błąd kwadratowy w trzech z czterech badanych przypadków. Jednak podpisy pod rysunkami 5.4, 5.7 i 5.10 powinny zawierać objaśnienia legend (np. "febio_eng", "febio_true"). Dodatkowo, bardziej szczegółowe omówienie wyników wzbogaciłoby tę sekcję rozprawy.

Rozdział 6 zawiera półempiryczny przykład weryfikujący rozszerzoną procedurę filtra Kalmana. Założono, że geometria i moduł Younga są znane, a zbieżność filtra została przetestowana w odniesieniu do dokładnych danych. Przedstawiono wyniki z pomiarów i danych pacjenta, przy czym podwójny rozszerzony filtr Kalmana (DEKF) wykazał dobrą zgodność z danymi laboratoryjnymi dla ciśnienia i przemieszczenia (rysunki 6.2 i 6.3) oraz dokładne przewidywania dla danych pacjentów (rysunki 6.4 i 6.5).

Rozdział 7 zawiera dyskusję i wnioski, sugerując potencjalne ulepszenia w rzeczywistych zastosowaniach proponowanego podejścia. Przeanalizowano w nim badanie na fantomie LCCA o różnej grubości i właściwościach mechanicznych, mierzonych za pomocą promieniowania rentgenowskiego, które w niektórych przypadkach ujawniło bimodalny rozkład grubości. Walidacja w rozdziale 5 wykazała dobrą zgodność z danymi z testów jednoosiowych, pomimo wyzwań związanych z pomiarami ultradźwiękowymi spowodowanymi odbiciami fal w szklanym pojemniku wypełnionym wodą. Kamery zapewniły wyższą precyzję pomiarów przemieszczenia (błąd: $1e-4$ mm) w porównaniu do

ultradźwięków (błąd: 0,03 mm), ze średnią różnicą 0,0113 mm. Układ eksperymentalny, szczegółowo opisany w pracy Sinek, Mesek i współautorzy [77], wykorzystywał efekty mieszane do ilościowego określenia niepewności pomiaru.

Głównym wkładem rozprawy doktorskiej jest zastosowanie podwójnego rozszerzonego filtra Kalmana (DEKF) do oszacowania zmiennych stanu (ciśnienie, przemieszczenie) i modułu Younga, uzyskując wartości (1,43-1,84 MPa) zbliżone do wyników eksperymentalnych (1,38-1,99 Mpa). W przypadku danych medycznych wyznaczony moduł Younga wahał się w zakresie 582-837 kPa, zgodnie z normami fizjologicznymi (613-988 kPa). Metoda ta jest obiecująca dla nieinwazyjnej oceny tętnic w czasie rzeczywistym, choć wyzwania takie jak niegaussowski szum w przetwornikach ciśnienia i rozmyte obrazy ultrasonograficzne wymagają dalszej uwagi. Model zredukowany jest zalecany w porównaniu z zewnętrznym oprogramowaniem do szybszych symulacji, potencjalnie ulepszony w celu oszacowania grubości ściany oraz sztywności.

Rozdział 8 zawiera materiały uzupełniające, takie jak wizualizacje zasady działania filtra Kalmana oraz kod w języku Python do przetwarzania danych i implementacji filtra Kalmana.

3. Główne osiągnięcia rozprawy doktorskiej

W mojej opinii głównymi osiągnięciami rozprawy doktorskiej są:

a) Opracowanie nieinwazyjnej metody szacowania modułu Younga

W pracy doktorskiej z powodzeniem opracowano nieinwazyjną procedurę szacowania modułu Younga lewej tętnicy szyjnej wspólnej (LCCA) poprzez integrację pomiarów przemieszczenia ściany opartych na ultradźwiękach z tonometrią aplanacyjną do pomiaru ciśnienia wewnątrz tętniczego. Podejście to eliminuje potrzebę stosowania technik inwazyjnych, zwiększając możliwości zastosowania klinicznego.

b) Walidacja modelu matematycznego na specjalnie zaprojektowanym stanowisku badawczym

Walidację modelu matematycznego przeprowadzono na niestandardowym stanowisku testowym, obejmującym fantom tętnicy, pompę pulsacyjną i precyzyjne urządzenia pomiarowe do rejestrowania danych dotyczących przepływu, ciśnienia i przemieszczenia

ściany. Stanowisko badawcze zapewnia niezawodną platformę zarówno do opracowywania, jak i testowania modeli. Opracowano model numeryczny i zweryfikowano go z danymi eksperymentalnymi ze stanowiska badawczego. Model ten skutecznie wspierał odwrotny problem szacowania sztywności tętnic (modułu Younga), wykazując dobrą zgodność z wynikami pomiarów. Poprzez analizę porównawczą liniowych modeli sprężystych i modelu Neo-Hookean, model Neo-Hookean został zidentyfikowany jako najbardziej odpowiedni do opisu zachowania tętnic, osiągając najniższy błąd średniokwadratowy w trzech z czterech przypadków.

c) Zastosowanie podwójnego rozszerzonego filtra Kalmana (DEKF)

Istotnym wkładem pracy doktorskiej jest innowacyjne zastosowanie podwójnego rozszerzonego filtra Kalmana do jednoczesnego oszacowania zmiennych stanu (ciśnienia i przemieszczenia) oraz modułu Younga. DEKF dał dokładne wyniki, z wartościami 1,43-1,84 MPa (w porównaniu do danych eksperymentalnych 1,38-1,99 MPa) dla fantomu i 582-837 kPa dla danych pacjenta, zgodnie z normami fizjologicznymi (613-988 kPa). Jest to moim zdaniem bardzo wartościowe osiągnięcie naukowe. Doktorant wykazał również wyższą precyzję pomiarów przemieszczenia opartych na pomiarach przy użyciu kamery (błąd: $1e-4$ mm) w porównaniu z ultradźwiękami (błąd: 0,03 mm), ze średnią różnicą 0,0113 mm. Ta poprawa dokładności pomiaru wzmacnia wiarygodność proponowanej metody.

d) Zastosowanie metody w warunkach rzeczywistych

Zaproponowana numeryczna metoda szacowania modułu Younga wykazuje przydatność do nieinwazyjnej oceny sztywności tętnic w czasie rzeczywistym w warunkach klinicznych. W rozprawie zidentyfikowano również możliwe do wprowadzenia ulepszenia - takie jak uwzględnienie szumu niegaussowskiego i opracowanie modelu uproszczonego (model niższego rzędu) w celu szybszych symulacji - umożliwiające praktyczne wdrożenie. Dzięki zastosowaniu zaawansowanych technik filtracji (DEKF) do badań nad tętnicami - tematu o ograniczonej wcześniejszej eksploracji (zaledwie 18 odpowiednimi artykułami zidentyfikowanymi na podstawie baz danych Scopus, Web of Science i Science Direct) - rozprawa może wypełnić ważną lukę badawczą i przyczynić się do

ustanowienia nowych procedur obliczeniowych dla nieinwazyjnej analizy biomechanicznej.

4. Uwagi krytyczne

Należy odnieść się do następujących uwag:

1. Moim zdaniem w przeglądzie literatury brakuje podsumowania wyjaśniającego nowatorstwo tej rozprawy doktorskiej w stosunku do analizowanych artykułów. Dlatego chciałbym poprosić o dodanie informacji o głównej nowości rozprawy doktorskiej w porównaniu z przytoczonymi w rozeznaniu literaturowym osiemnastoma artykułami.
2. Proszę o podanie głównych zalet i wad (ograniczeń) metody podwójnego rozszerzonego filtra Kalmana.
3. Proszę o podanie informacji o dokładności pomiarów (dla ciśnienia, natężenia przepływu i przemieszczenia). Moim zdaniem w celu porównania wyników pomiarów z modelem matematycznym dobrze byłoby pokazać słupki błędów wykonanych pomiarów.
4. Dlaczego tylko dwie siatki zostały użyte do walidacji wyników MES? Czy dalsze zagęszczenie siatki obliczeniowej ma wpływ na wyniki ?
5. Dlaczego istnieje niewielka różnica między wynikami statycznej i dynamicznej analizy MES?
6. Podpisy do rysunków 5.4, 5.7 i 5.10 powinny zawierać objaśnienia legend (np. "febio_eng", "febio_true"). Ponadto w rozdziale 5 potrzebne jest bardziej szczegółowe omówienie wyników obliczeń.

5. Wniosek końcowy

W pełni rekomenduję ocenianą rozprawę do publicznej obrony i wnioskuję do Rady Naukowej dyscypliny inżynieria biomedyczna Politechniki Śląskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony. W mojej ocenie Doktorant osiągnął wszystkie zaplanowane w rozprawie doktorskiej cele. Rozprawa spełnia również wymagania stawiane przez odpowiednie ustawy (Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz. U. z 2024 r. poz. 1571, z późn. zm). Doktorant opracował nieinwazyjną metodę

szacowania modułu Younga lewej tętnicy szyjnej wspólnej (LCCA). Metoda została zweryfikowana przez obszerne badania eksperymentalne i wykazała dobrą dokładność, a także znaczny potencjał w rzeczywistych zastosowaniach. Warto podkreślić również że doktorant opublikował jedną pracę w czasopiśmie Measurement (Elsevier, Q1), a także 7 rozdziałów w monografiach. Ze względu na wysoką wartość merytoryczną rozprawy oraz duży dorobek naukowy Doktoranta rekomenduję wyróżnienie ocenianej rozprawy doktorskiej.