



RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ mgr inż. Mateusza Troki

zatytułowanej:

Unsupervised Machine Learning in Biomechanical Data Analysis. Medical Application of Self-Organising Maps

napisanej pod opieką naukową Pani dr hab. inż. Izabeli Lubowieckiej.

1. PODSTAWA FORMALNA OPRACOWANIA RECENZJI

Podstawą formalną do opracowania niniejszej recenzji stanowi uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Gdańskiej z dnia 29 stycznia 2025 roku.

2. CHARAKTERYSTYKA I OCENA AKTUALNOŚCI TEMATU ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska skupia się na oszacowaniu możliwości wykorzystania jednej z metod nienadzorowanego uczenia maszynowego do analizy i oceny danych biomedycznych uzyskanych z pomiarów odkształceń powłoki brzusznej człowieka oraz pomiarów aktywności elektrycznej stawu skroniowo-żuchwowego (TMJ) metodą elektromiografii powierzchniowej (sEMG)

Tematyka pracy łączy zagadnienia wytrzymałości materiałów, biomechaniki i informatyki, leżąc na pograniczu dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna i biomedyczna, z widoczną przewagą tej ostatniej.

W ocenianej rozprawie z powodzeniem podjęto próbę zastosowania map samoorganizujących się (SOM), modelu nienadzorowanej sieci neuronowej, do grupowania i wizualizacji uzyskanych danych biomechanicznych na podstawie ich podobieństwa. Istotną cechą podjętego tematu jest interdyscyplinarność połączona z walorami praktycznego wykorzystania ich w medycynie czy inżynierii biomedycznej. Temat pracy wykazuje cechy nowości naukowej i wpisuje się w aktualne kierunki badań z wykorzystaniem bardzo ostatnio popularnych metod uczenia maszynowego. Zastosowanie metody SOM do identyfikacji obszarów ściany brzucha człowieka, które wykazują pewne podobieństwo pod względem mechanicznym oraz do oceny pracy mięśni otaczających staw skroniowo-żuchwowy na podstawie aktywacji mięśni wokół stawu stanowi cenny wkład w rozwój dyscypliny naukowej.

Z powyższych względów **tematyka recenzowanej rozprawy mieści się w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.**

3. OPIS ZAWARTOŚCI ROZPRAWY

Rozprawa doktorska napisana jest w języku angielskim i składa się z siedmiu rozdziałów, wykazu literatury, spisu tabel i rysunków (95 sztuk), streszczenia w języku polskim i angielskim, oświadczeń i krótkiego życiorysu autora.

Dysertację napisano w formie klasycznej rozprawy z licznymi odnośnikami do publikacji autora, co świadczy o jego wysokiej aktywności publikacyjnej. W mojej opinii wskazane publikacje mogłyby być podstawą do nadania stopnia doktora bez wydawania rozprawy w formie monografii. Układ rozdziałów jest dobrze przemyślany, układający się w logiczną całość, a ich zawartość odpowiada poszczególnym tytułom. Mankamentem, utrudniającym swobodne czytanie i zrozumienie rozprawy, jest brak wykazu skrótów, które są często używane w tekście.

W pracy doktorskiej sformułowano następującą tezę: *zastosowanie nienadzorowanego modelu uczenia maszynowego, a mianowicie metody mapy samoorganizującej się, do biomechanicznych danych eksperymentalnych oferuje nowatorskie podejście do odkrywania ukrytych właściwości w zbiorach danych*. Aby udowodnić powyższą tezę dwa medyczne problemy zostały przeanalizowane metodami stosowanymi w inżynierii i technice, mianowicie:

- a) Identyfikacja obszarów o podobnych cechach mechanicznych w ścianach brzucha pacjenta, korzystając z pełno-polowych pomiarów metodą cyfrowej korelacji obrazu.
- b) Ocena potencjalnej dysfunkcji stawu skroniowo-żuchwowego poprzez analizę sygnału z elektromiografii powierzchniowej (sEMG) z mięśni otaczających staw.

Autor postawił sobie ambitny cel rozwiązania dwóch problemów biomechaniki, tj.: niewydolność ściany brzucha i dysfunkcji stawu skroniowo-żuchwowego za pomocą analizy SOM. Zarówno, tezę pracy jak i jej cel uważam za prawidłowe i zasadne, jasno wynikające z treści rozprawy doktorskiej, choć drugi problem potraktowano nieco pobieżnie.

Rozdział pierwszy „*Introduction*” składa się z dwunastu stron i przedstawia wspomnianą wcześniej tezę pracy, streszczenie wszystkich rozdziałów, wykaz trzech współautorskich publikacji naukowych doktoranta (autora dysertacji) bezpośrednio związanych z wynikami przedstawionymi w dysertacji, opis problematyki badań powłok brzusznych i stawu skroniowo-żuchwowego oraz cel tych badań.

Rozdział drugi „*State of the Art*” przedstawia przegląd literatury dotyczący aktualnego stanu wiedzy w zakresie analizy danych biomechanicznych z wykorzystaniem

uczenia maszynowego (Machine Learning, ML). Główny nacisk położono na różnice w zastosowaniach wynikające z wyboru konkretnego algorytmu..

Rozdział trzeci zatytułowany „*Unsupervised Machine Learning*” na 11 stronach przedstawia założenia algorytmów uczenia maszynowego, ze szczególnym uwzględnieniem metod nienadzorowanych oraz klasteryzacji.

Rozdział czwarty „*Deformation Definition and Measures*” to bardzo krótka (5 stron) i pobieżna charakterystyka podstawowych pojęć mechaniki, takich jak: odkształcenie, naprężenie i deformacja ciał, a także podstaw mechaniki ośrodków ciągłych.

Rozdział piąty „*Human Abdominal Wall*” poświęcony jest obszernym badaniom, zawartym na 59 stronach, których celem było zidentyfikowanie mechanicznie podobnych obszarów przedniej ściany jamy brzusznej człowieka z wykorzystaniem map samoorganizujących się (Self-Organising Maps, SOM), czyli nienadzorowanego modelu uczenia maszynowego. Omówione zostały dane eksperymentalne dotyczące zachowania mechanicznego ludzkiej ściany brzucha pod zmiennym ciśnieniem. Na ich podstawie opracowano i przeprowadzono metodologię grupowania danych o odkształceniach. Mapy samoorganizujące się są szczególnie skuteczne w grupowaniu danych i redukcji wymiarowości przestrzeni danych, co jest kluczowe przy analizie złożonych stanów deformacji dla różnych poziomów obciążenia w eksperymentach biomechanicznych.

Natomiast, w rozdziale szóstym, na 19 stronach, zaproponowano zastosowanie techniki map samoorganizujących się (Self-Organising Maps, SOM) w celu identyfikacji podobieństw pomiędzy wieloma pacjentami pod względem aktywności mięśni w okolicy stawu skroniowo-żuchwowego (TMJ). Ocenę aktywności dokonano poprzez analizę sygnałów uzyskanych z elektromiografii powierzchniowej (sEMG).

Następnie w rozdziale siódmym (5 stron) zawarto ogólne podsumowanie rozprawy, choć wnioski dotyczące poszczególnych zagadnień medycznych omówiono przy poszczególnych rozdziałach, oraz plany na przyszłość badawczą doktoranta.

W ostatniej części pracy umieszczono spis literatury składający się z 97 pozycji. Zawartość rozprawy odpowiada tytułowi, układ rozdziałów jest dobrze zorganizowany, a ocena ich zawartości przedstawiona jest w sekcji następnej.

4. OCENA MERYTORYCZNA ROZPRAWY

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Troki jest ważna i interesująca zarówno z naukowego, a przede wszystkim aplikacyjnego punktu widzenia. Niewątpliwie zawiera elementy nowości naukowej polegające na połączeniu metod badań biomedycznych i uczenia maszynowego w celu osiągnięcia praktycznych korzyści wynikających z ich połączenia. Jednakże sam aspekt naukowy pracy i wskazanie wyraźnie

nowości naukowej powinno być lepiej wyeksponowane, zwłaszcza w aspekcie wiodącej dyscypliny naukowej. Słabo w tym względzie prezentuje się rozdział 4, który poza hipotezą Greena—Lagrange’a, przedstawia podstawową wiedzę studencką. Niemniej jednak, podsumowując ocenę merytoryczną rozprawy stwierdzam, że do najważniejszych osiągnięć i głównych zalet tej pracy doktorskiej należy:

- a) Opracowanie metodologii identyfikacji stref przedniej ściany brzucha żyjącego człowieka, które wykazują podobne zachowanie mechaniczne przy zmieniającym się ciśnieniu. Metodologia wykorzystuje bezinwazyjne badania przemieszczeń brzucha człowieka, cyfrową korelację obrazu i uczenie maszynowe. Zaletą metodologii jest jej bezinwazyjność i możliwość analizowania wielowymiarowych zestawów danych (dane o pełnym polu odkształceń brzucha w wielu chwilach czasowych jednocześnie, czyli podczas całego procesu obciążania). Metodologia może być wykorzystana np. do wspomagania planowania operacji przepuklin brzusznych w zakresie doboru i sposobu wszczepiania implantu mechanicznie kompatybilnego z danym rejonem brzucha. Może też mieć wpływ na zoptymalizowane projektowanie nowych implantów poprawiających komfort życia pacjenta po zabiegu. Ponadto, przedstawiona metodyka może być stosowana do upraszczania procedury identyfikacji parametrów materiałowych materiałów niejednorodnych (poprzez redukcję liczby zmiennych do parametrów w podobnie zachowujących się strefach). Ściana brzucha człowieka, jako struktura złożona, niejednorodna i anizotropowa jest dobrym tego przykładem.
- b) Wykazanie zmienności pól odkształceń (odkształcenia główne i ich kierunki) w różnych rejonach przedniej ściany brzucha człowieka u różnych badanych pacjentów w czasie obciążenia. Zaobserwowano, że kierunki odkształceń głównych zmieniają się ze wzrostem obciążenia, ale inaczej się zmieniają u różnych badanych osób.
- c) Opracowanie metodologii wykorzystującej mapy samoorganizujące się do identyfikacji podobieństw w zachowaniu mięśni wokół stawu skroniowo-żuchwowego na podstawie ich aktywacji, co posiada istotny potencjał do wykorzystania we wczesnym wykrywaniu i identyfikacji potencjalnych dysfunkcji stawu.
- d) Zaproponowana metodologia bazująca na badaniach *in vivo* oraz SOM może wspomagać tzw. medycynę spersonalizowaną, która będzie się intensywnie rozwijać w kolejnych latach.

Mgr inż. Mateusz Troka zdefiniował sobie jasny cel badań i samodzielnie go rozwiązał. Posiada więc umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej na odpowiednim poziomie jak również posługiwania się zaawansowanym aparatem matematycznym do rozwiązywania zagadnień z zakresu inżynierii mechanicznej i biomedycznej.

5. UWAGI KRYTYCZNE, PYTANIA MERYTORYCZNE ORAZ

DYSKUSYJNE

Podczas recenzji przedstawionej rozprawy doktorskiej nasunęły mi się pewne uwagi, pytania i wątpliwości wymienione poniżej.

A. UWAGI MERYTORYCZNE

1. Rozdział 2 powinien zakończyć się podsumowaniem z którego wynika nowość naukowa rozprawy i uzasadnienie braku rozwiązania podjętego problemu.
2. Rozdział 4, Sekcja 4.1 rozpoczyna się od opisu klasycznej hipotezy wytrzymałościowej Hooke'a dla typowych metalowych materiałów konstrukcyjnych. Autor nie zdefiniował celu wprowadzenia tego opisu, ani materiału dla którego będzie ona zastosowana. W przypadku tkanek jest ona całkowicie niezasadna, co zresztą pokazano w dalszej części pracy. Wynika z tego wniosek że rozdział 4.1 oraz 4.2 nie wnoszą żadnej nowej wiedzy, co więcej mogą wprowadzać błędne teorie, których nie stosuje się do tkanek.
3. Tytuł rozdziału 4 i 5 nie daje wystarczającej informacji co do zawartości. Są one zbyt ogólne.
4. Na str. 84, rozdział 5.2.5 zapisano że „The best overall classification into clusters had patients D1-D7 and D12” – dlaczego? Z analizy wyników zawartych w Tabeli 5.5 wynika coś zupełnie innego, tj. pacjent D6 jest bardzo słabo sklasyfikowany.
5. Str. 92, Rozdział 5.2.7 opisana jako warta uwagi analiza nr 5 nie występuje w ogóle w tabeli 5.6.
6. Str. 93-94, na Rys 5.74-75 pokazano główne odkształcenie Lagrangea dla pacjentów D3-D12. Dlaczego nie dla wszystkich? Brak takiego wyjaśnienia.
7. Str. 94-95, mapy na Rys. 5.74 i 5.75 odnoszą się do wybranych chwil czasowych T1-T1, co nie daje kluczowej informacji o ciśnieniu panującym w jamie brzusznej, a takie było założenie aby wykazać istotne zależności w funkcji ciśnienia. Tym bardziej, że we wnioskach (rozdział 5.3) ponownie mowa jest o wpływie zmiennego ciśnienia. W tej sytuacji wniosek zawarty w ostatniej sekcji na str. 96 jest trudny do udowodnienia.
8. Str.99, Rozdział 6.1.1 odsyła czytelnika do pracy Troka et al. (2022) w celu uzupełnienia opisu procedury pomiarowej. W mojej opinii są to kluczowe informacje które powinny znaleźć się w rozprawie.
9. Str. 102, Rozdział 6.1.2 omawia między innymi procedurę normowania danych z pomiaru stawu skroniowo-żuchwowego. Czy pomiar powłok brzuch również był normowany? Brak jest informacji na ten temat. Jeśli nie, to dlaczego?
10. Str. 119, Rozdział 7 – czy uzasadniony jest wniosek mówiący, że sEMG dostarcza cennych informacji na temat wydajności mięśni pacjentów? Badania wydajności nie były

przecież robione.

11. Str. 119, Rozdział 7.1 – czy uzasadniony jest wniosek mówiący, że testowane powierzchnie brzucha identyfikują podobne właściwości mechaniczne? Z właściwości mechanicznych tylko odkształcenie było mierzone i analizowane.
12. Biorąc pod uwagę całość pracy nasuwa się pytanie czy teza pracy została w pełni udowodniona, zwłaszcza w swojej drugiej części mówiącej, że zaproponowana metoda oferuje nowatorskie podejście do odkrywania ukrytych właściwości w zbiorach danych?

B. UWAGI EDYCYJNE

13. Brak spisu skrótów utrudniający czytanie i zrozumienie rozprawy
14. Str.8 – The methodology presented in the thesis methodology....
15. Str. 23 zawiera wzór błędnie opisany poprzez symbole „M” i „N”. Na str. 25 i 27 zdefiniowano je poprawnie. Trzykrotne powtórzenie tego samego wzoru nie jest konieczne.
16. Str. 32 zawiera równanie (bez numeru) i Rys. 4.1 w którym naprężenia normalne są oznaczone jako raz jako τ , a potem jako σ . Natomiast we równaniu (4.3) τ oznacza już naprężenia styczne.
17. Str. 84-85 – powtórzenie wartości D9-D12
18. Rys. 5.43 - 5.64 przedstawiają te same informacje dla różnych pacjentów. Należało zgrupować je na jednym wykresie (tabeli) i nie powielać kilkanaście razy tych samych podpisów.
19. Dlaczego wykresy na Rys. 5.65 i 5.66 podzielona na dwa osobne? Podobnie Rys. 5.67 i 5.68, 5.69 i 5.70, itd.
20. Str. 94-95, mapy na Rys. 5.74 i 5.75 są zbyt małe, nieczytelne.
21. Str. 99 „temporo-mandibular joint” raz jest pisany łącznie a raz z łącznikiem.
22. Rys 6.5 -6.12 mają różne wielkości

6. OCENA ROZPRAWY I WNIOSEK KOŃCOWY

Oceniając całość rozprawy uważam, że mgr inż. Mateusz Troka wykazał się dobrą wiedzą teoretyczną w dziedzinie nauk inżynierjno-technicznych, z łatwością łączy zagadnienia inżynierii mechanicznej i biomedycznej. Przeprowadzone przez Autora rozprawy badania numeryczne i doświadczalne zostały starannie wykonane i charakteryzują się wysokim stopniem zaawansowania. Wprawdzie Doktorant korzystał z gotowych procedur obliczeniowych (Matlab), ale umiejętnie je zastosował do osiągnięcia celu rozprawy. Szczególnie cenne jest przeprowadzenie pomiarów *in vivo*, co świadczy o wysokich

kwalifikacjach do prowadzenia badań naukowych i dużym potencjale poznawczym zaproponowanej metody. Ponadto, Doktorant opublikował uzyskane wyniki w 3 publikacjach, co tylko potwierdza oryginalność tematu i wysoką jakość naukową badań. Otrzymane wyniki pozwoliły wzbogacić istniejącą wiedzę, co stanowi oryginalny wkład w rozwój dyscypliny.

Pomimo pewnych słabych stron pracy, które przedstawiłem w sekcji 5, moja całościowa ocena recenzowanej rozprawy doktorskiej jest pozytywna. Biorąc pod uwagę wartość naukową, poznawczą i aplikacyjną pracy stwierdzam, że spełnia one wszystkie aktualnie obowiązujące wymogi stawiane pracom doktorskim, określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce i stanowi podstawę merytoryczną do ubiegania się o stopień doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Wobec tego, wnoszę o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie mgr inż. Mateusza Troki do publicznej obrony.

Rafał Rusinek