



dr hab. inż. Mariusz Ptak, prof. uczelni
Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny
Katedra Konstrukcji Badań Maszyn i Pojazdów
ul. Łukasiewicza 7, 50-371 Wrocław

Wrocław, 16.06.2025

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana **mgr inż. Mateusza TROKI** p.t.:

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

(w j. polskim: Nienadzorowane Uczenie Maszynowe w Analizie Danych
Biomechanicznych. Medyczne Zastosowanie Map Samoorganizujących),

której promotorem jest dr hab. inż. Izabela Lubowiecka, prof. uczelni

1. PRZEDMIOT I ZAKRES ROZPRAWY

Rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Troki dotyczy zastosowania nienadzorowanego uczenia maszynowego, a w szczególności map samoorganizujących (Self-Organising Maps – SOM), w analizie danych biomechanicznych pochodzących z badań *in vivo*. W odróżnieniu od wielu wcześniejszych prac koncentrujących się na biernym odwzorowaniu mechanicznym, Autor wprowadza dane dynamiczne pochodzące od oddychających pacjentów, analizując mechaniczne odpowiedzi ściany brzucha w fazach wdechu i wydechu. Uwzględnienie cyklu oddechowego pozwala uchwycić zmiany kierunków naprężeń głównych i lepiej odzwierciedla złożone, nieliniowe i anizotropowe zachowanie ściany brzucha człowieka. Znaczenie przeprowadzonego badania wynika z kilku kluczowych aspektów. Po pierwsze, analiza mechaniki ściany brzucha w warunkach rzeczywistych (*in vivo*) z uwzględnieniem aktywności mięśni podczas oddychania stanowi ważny krok w kierunku poprawy rekonstrukcji chirurgicznych i projektowania materiałów, takich jak siatki przepuklinowe, bardziej dopasowanych do lokalnych warunków biomechanicznych. Po drugie, wykorzystanie metod sztucznej inteligencji, takich jak SOM, w analizie danych biomechanicznych jest relatywnie nowym podejściem, umożliwiającym przetwarzanie i interpretację złożonych, wielowymiarowych danych w sposób bardziej intuicyjny i diagnostycznie użyteczny.

W drugiej części rozprawy badaniami objęto obszar stawu skroniowo-żuchwowego (TMJ). Analizowano aktywność mięśni żucia w oparciu o sygnały powierzchniowej elektromiografii (sEMG) zarejestrowane podczas różnych ruchów żuchwy. W tej

części zastosowanie map samoorganizujących pozwoliło na klasyfikację pacjentów i grupowanie powtarzalnych wzorców aktywności mięśniowej. Tym samym, zakres rozprawy obejmuje rozwój metodyki analizy wielowymiarowych danych biomechanicznych w oparciu o SOM, zarówno dla zastosowań w obszarze biomechaniki tkanek miękkich (ściana brzucha), jak i dla oceny funkcji mięśniowo-stawowej w obrębie stawu skroniowo-żuchwowego.

Rozprawa ma także istotny wymiar aplikacyjny – uzyskane wyniki mogą znaleźć zastosowanie w spersonalizowanym planowaniu zabiegów chirurgicznych, ocenie ryzyka powikłań oraz w długoterminowym monitorowaniu pacjentów. Ponadto, zaprezentowane podejście może być wykorzystane również w innych obszarach analizy ruchu i sygnałów biologicznych, takich jak elektromiografia w badaniach stawu skroniowo-żuchwowego. Zakres rozprawy obejmuje rozwój metod analitycznych oraz praktyczne zastosowanie narzędzi SOM do wspomagania diagnostyki medycznej i personalizacji terapii. Wg recenzenta wpisuje się w aktualne trendy rozwoju nowoczesnych technologii inżynierii mechanicznej i biomedycznej.

2. UWAGI OGÓLNE I SZCZEGÓŁOWE

Praca ma charakter interdyscyplinarny, łącząc zagadnienia z zakresu inżynierii mechanicznej, biomechaniki i informatyki technicznej. Autor wykazuje się szeroką wiedzą w tych dziedzinach.

Głównym celem rozprawy było opracowanie narzędzia umożliwiającego szybkie rozpoznawanie i klasyfikację pacjentów o zbliżonych parametrach biomechanicznych. Praca w udany sposób pokazuje możliwości zastosowania map samoorganizujących jako metody eksploracji dużych zbiorów danych, oferując intuicyjne narzędzie do wizualizacji i grupowania w kontekście klinicznym. Jednym z kluczowych wniosków jest to, że pomimo użycia różnych zmiennych, istotne cechy indywidualnych pacjentów były konsekwentnie identyfikowane w analizie SOM. Choć sposób formowania klastrów ulegał zmianom, ogólny wzorzec zachowań mechanicznych pozostawał rozpoznawalny.

Uwagi szczegółowe:

1. W rozprawie zdecydowanie brakuje tabeli skrótów i oznaczeń,
2. Znaczna część rozprawy bazuje na uprzednio opublikowanych pracach, których doktorant jest współautorem. Cytowania są prawidłowe, jednak nie zawsze jasna jest indywidualna rola doktoranta w opracowaniu konkretnych wyników.
3. Język i styl: Występują liczne kolokwializmy i błędy gramatyczne w języku angielskim, m.in.: „was fueled”, „for good”, „I have scratched the surface of...”,

- użycie „like” zamiast „such as”, błędy w tytułach rozdziałów. Szczególnie *Vita* zawiera nieakademicki ton.
4. Brakuje uzasadnienia dla wyboru metody SOM. Czy doktorant rozważał inne techniki nienadzorowanego uczenia, np. PCA, t-SNE, DBSCAN lub metody oparte na klasteryzacji hierarchicznej? Czy próbował podejścia opartego na modelowaniu MES?
 5. Na s. 6 Autor stwierdza, że brak jest danych dotyczących własności mechanicznych ściany brzucha – należałoby odnieść się do złożonych modeli materiałowych dostępnych m.in. w GHBM, THUMS, PIPER.
 6. Rozdział 1 zaczyna się od bezpośredniego sformułowania tezy, bez uprzedniego wprowadzenia czytelnika w zagadnienie.
 7. Umieszczenie listy tabel i rysunków - zdaniem recenzenta, lista ta powinna znaleźć się na końcu pracy, a nie na początku.
 8. Opisy tabel powinny znajdować się nad tabelami, a nie pod nimi.
 9. Nie przedstawiono w wystarczający sposób procesu walidacji uzyskanych wyników grupowania – brakuje np. oceny stabilności klastrów. Warto byłoby szczegółowo wyjaśnić, w jaki sposób Autor ocenił poprawność i powtarzalność uzyskanych podziałów, a także czy podjęto próby ilościowej weryfikacji wyników (np. porównanie z innymi algorytmami grupowania).
 10. Rysunki 3.2 i 3.3 mogą pochodzić z literatury – jeśli tak, to brakuje cytowań źródłowych.
 11. Rozdział 4: Zbyt ogólny, wprowadzający podstawowe pojęcia mechaniki. Przykłady jak $\sigma = F/A$ czy schematy deformacji (Fig. 4.3) są zbyt elementarne dla pracy doktorskiej.
 12. Tabela 5.1: Należałoby wstępnie zaznaczyć, że pacjent D8 i D17 to ta sama osoba w różnych momentach czasowych – taka informacja pojawia się dopiero na stronie 42. Co więcej, liczba miejsc znaczących dla tej samej wielkości powinna być jednakowa dla wszystkich pacjentów – jeśli pomiar dokonywano przy użyciu tego samego narzędzia (tutaj wagi).
 13. Opis stanowiska pomiarowego (rys. 5.1 i 5.2) – brakuje opisu elementów stanowiska, zastosowanych urządzeń, układu DIC.
 14. W opisie wyników, np. fig. 5.3, brakuje informacji o pozycji badanych osób.
 15. W fig. 5.4 powinno zostać wskazane, które punkty zostały analizowane – np. naniesienie punktów na pacjenta, np. tak jak w fig. 5.8.
 16. Wyniki przedstawione na stronach 55–83 zawierają szczegółowe zestawienia dla poszczególnych pacjentów i powinny zostać przeniesione do załącznika. Natomiast od podrozdziału 5.2.5, gdzie rozpoczyna się zbiorcza analiza danych, układ i poziom szczegółowości są już właściwe i dobrze podsumowują otrzymane wyniki.
 17. Rozdział 6 (staw skroniowo-żuchwowy): Brakuje informacji czy doktorant uczestniczył w badaniach eksperymentalnych. Opis jest niepełny – nie wiadomo jak wyglądał pomiar sEMG, jak zbierano dane, jakie były ustawienia pomiarowe.
 18. Proszę też o odpowiedź: jaką wartość dodał dla dziedziny inżynierii mechanicznej wnosi przedstawiona rozprawa i w jaki sposób wyniki tej pracy

mogą zostać wykorzystane w praktyce inżynierskiej lub w dalszych badaniach naukowych?

Ogólnie, rozdział poświęcony analizie stawu skroniowo-żuchwowego (TMJ) sprawia wrażenie nie w pełni spójnego z resztą pracy. Przede wszystkim brak jest jednoznacznego powiązania tej części z głównym celem rozprawy, jakim jest analiza mechaniki ściany brzucha i rozwój metod klasyfikacji opartych na SOM w kontekście biomechaniki układu mięśniowo-szkieletowego. Część ta opiera się na danych z powierzchniowej elektromiografii (sEMG), jednak nie wyjaśniono, czy doktorant brał udział w przeprowadzaniu badań, czy jedynie analizował gotowy zbiór danych. Brakuje również opisu stanowiska badawczego, procedur pomiarowych, metodyki zbierania danych oraz charakterystyki grupy pacjentów. Brak jest odniesienia do potencjalnych zmiennych zakłócających oraz do kryteriów wyboru badanych. Niewystarczająco omówiono również, w jaki sposób analizowane dane zostały przetworzone przed użyciem map samoorganizujących.

Pod względem narracyjnym rozdział 6. odbiega od reszty rozprawy – sprawia wrażenie wprowadzonego wtórnie, bez wystarczającego osadzenia w strukturze pracy. Tematyka TMJ, choć sama w sobie ważna, wymagałaby pogłębionego wprowadzenia teoretycznego i lepszego uzasadnienia, dlaczego znalazła się w tej konkretnej rozprawie. W obecnym kształcie rozdział ten bardziej przypomina oddzielne studium przypadku niż integralną część spójnej koncepcji badawczej.

Mocne strony pracy:

- Integracja danych eksperymentalnych in vivo (DIC, sEMG) z analizą nienadzorowaną
- Opracowanie podejścia umożliwiającego wizualizację wielowymiarowych danych w kontekście klinicznym
- Interdyscyplinarność łącząca mechanikę, informatykę i medycynę
- Potencjał aplikacyjny w diagnostyce i planowaniu leczenia spersonalizowanego
- Wysoka jakość składanego tekstu
- Rzetelny i aktualny przegląd literatury z uwzględnieniem najnowszych publikacji
- Umiejętność interpretacji zmienności danych pacjentów i powiązanie ich z cechami indywidualnymi
- Sprawne wykorzystanie map samoorganizujących do identyfikacji powtarzalnych wzorców w danych
- Umiejętność formułowania praktycznych wniosków z wyników analizy

3. PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY

Rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Troki porusza aktualne i istotne zagadnienia związane z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji do analizy danych biomechanicznych. Przedstawione podejście ma wartość aplikacyjną, w szczególności w diagnostyce medycznej i planowaniu zabiegów operacyjnych. Mocną stroną pracy jest interdyscyplinarność, udane połączenie pomiarów eksperymentalnych z zaawansowaną analizą danych oraz dobre przygotowanie merytoryczne doktoranta w zakresie mechaniki i przetwarzania danych. Do słabszych stron należy zaliczyć niepełne opisy stanowisk i metod eksperymentalnych, brak jasności co do wkładu własnego doktoranta w część dotyczącą TMJ oraz niedociągnięcia językowe i redakcyjne. Mimo to, przedstawione wyniki i metodyka analizy danych wskazują na wysoki poziom merytoryczny rozprawy.

Pomimo wskazanych uwag, praca posiada dużą wartość wdrożeniową i zasługuje na uznanie. Proponuję dalsze doskonalenie pracy, zwłaszcza w zakresie aspektów naukowych oraz uwzględnienie uwag formalnych. Podsumowując, stwierdzam, że praca doktorska pt. „*Unsupervised Machine Learning in Biomechanical Data Analysis. Medical Application of Self-Organising Maps*” spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2023 r. poz.742 z późn. zm.) oraz wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

dr hab. inż. Mariusz Ptak, prof. uczelni

