



Politechnika Wrocławska



Wydział Elektroniki,
Fotoniki i Mikrosystemów

Wrocław, 30 stycznia 2024

dr hab. inż. Grzegorz Świrniak., prof. PWr
Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wrocławska
ul. B. Prusa 53/55, 50-317 Wrocław
e-mail: grzegorz.swirniak@pwr.edu.pl
tel. +48 661 864 817

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Adama Łysiaka
pt.: „Automatic Diagnosis of the Patient’s Knee Joint Using Selected Methods of
Vibroarthrographic Signal Analysis”

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Mirosław Szmajda, prof. uczelni

Promotor pomocniczy: dr hab. Dawid Bączkowicz, prof. uczelni

Podstawa formalna opracowania recenzji

Recenzję wykonano w odpowiedzi na uchwałę Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne z 24 listopada 2023 r., zgodnie z zapisami Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z 20 lipca 2018 r.

1. Rozwiązywany problem naukowy

Tematyka przedstawionej do recenzji pracy doktorskiej została jasno sformułowana w streszczeniu i we wstępie manuskryptu i dotyczy nieinwazyjnej diagnostyki wybranych schorzeń i zmian zwyrodnieniowych stawów przy wykorzystaniu wibroartrografii (VAG), czyli innowacyjnej metody rejestrującej drgania wytwarzane przez poruszające się powierzchnie stawowe. Motywacją badań autora była z jednej strony potrzeba społeczna w zakresie dostarczania nowych narzędzi automatycznej diagnostyki medycznej, a od strony naukowej – poprawa dokładności klasyfikacji obecnie istniejących metod wibroartrograficznych. Z powyższego wynika, że prace badawcze w tym obszarze mają duże znaczenie praktyczne.

Rozwiązywanym problemem naukowym było opracowanie algorytmu maszynowego realizującego zadanie klasyfikacji w rozpoznawaniu wybranych schorzeń i zwyrodnień stawu kolanowego na podstawie sygnałów wytwarzanych przez poruszające się powierzchnie stawowe. Tak postawiony problem ma charakter nowatorski, ponieważ publikacje dotyczące analizy sygnałów w ocenie funkcjonowania narządów ruchu przy użyciu wibroartrografii są bardzo nieliczne. Jest on właściwy dla pracy doktorskiej w dziedzinie **nauk inżynieryjno-technicznych**, w dyscyplinie **automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne**. Wynika to z faktu, że rozwiązywany problem naukowy i przyjęta metodyka dotyczą elektronicznych systemów pomiarowych, technik i technologii pomiarowych, algorytmicznego przetwarzania danych oraz automatyzacji procesu podejmowania decyzji.

Celem pracy (str. 3) była analiza cech sygnałów zarejestrowanych z wykorzystaniem wibroartrografii, a w szczególności identyfikacja parametryczna prowadząca do wyodrębnienia cech użytecznych w diagnostyce stawu kolanowego. Wyróżniono przy tym 14 aspektów tej analizy, w tym: i) badania w dziedzinie czasu, częstotliwości oraz dziedzinie czasowo-częstotliwościowej, ii) wybór informatywnego zestawu cech, iii) wybór algorytmu uczenia maszynowego, który umożliwi rozwiązywanie problemu klasyfikacji z lepszym rezultatem niż dotychczas opracowane modele. Cele szczegółowe uzupełniają cele uzupełniające, mające pomóc doktorantowi w wyborze najbardziej istotnych cech sygnału pomiarowego, które są powiązane z problemem badawczym, jednocześnie minimalizując ilość powtarzających się informacji między nimi.

Cel pracy wynika bezpośrednio z rozwiązywanego problemu naukowego, jest przy tym rozbudowany i obejmuje wiele etapów, co jest typowe dla kompleksowych projektów badawczych lub rozwojowych. Takie sformułowanie celu badań uznaję za właściwe.

Teza badawcza głosi, że (str. 3, tłum.): „Zastosowanie metod cyfrowego przetwarzania sygnałów w analizie sygnału wibroartrograficznego, szczególnie w dziedzinie czasu, częstotliwości i dziedzinie czasu i częstotliwości, umożliwi wyodrębnienie cech pozwalających na klasyfikację schorzeń stawu kolanowego z dokładnością większą niż obecnie stosowane metody (0,69)”.

Postawiona teza ma odpowiedni potencjał badawczy i dobrze nakreśla kierunek badań.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Praca doktorska mgr inż. Adama Łysiaka ma charakter badań stosowanych, podejmowanych w celu zdobycia nowej wiedzy i zorientowanych na zastosowanie w praktyce. Rozprawa składa się z 21 wyróżnionych części, w tym z 14 rozdziałów numerowanych, i liczy 222 strony tekstu. Układ pracy jest poprawny i odzwierciedla klasyczny schemat publikacji naukowych.

We wprowadzeniu Autor przedstawia w syntetyczny sposób motywację, tezę i cele badawcze, a także opisuje strukturę pracy.

Rozdział 2 prezentuje tło badań, w tym elementy anatomii stawu kolanowego, opis schorzeń stawu kolanowego (chondromalacja, osteoartroza) w kontekście wykorzystywanej metody

badawczej oraz krótką charakterystykę metod diagnostycznych (RTG, TK, MRI, USG oraz VAG). Informacje te zostały opracowane w oparciu o doniesienia literaturowe. Ostatnim elementem tego rozdziału jest opis badań analitycznych VAG przeprowadzonych na grupie 184 pacjentów i które były źródłem danych pomiarowych dla Autora. W grupie badawczej wyróżniono 26 pacjentów z chondromalacją I stopnia, 30 – II st., 36 – III st., oraz 26 pacjentów z osteoartrozą. Grupa kontrolna liczyła 66 pacjentów. Scharakteryzowano sprzęt pomiarowy i zasady akwizycji danych.

Rozdział 3 to bardzo dobry przegląd kolejnych etapów przetwarzania sygnału i analizy danych w metodzie VAG, opracowany na podstawie doniesień literaturowych. Są to: dane na temat rodzaju czujników i ich umiejscowienia, wykorzystywane częstotliwości próbkowania, warunki i przebieg badań, metody wstępnego przetwarzania sygnału (różne metody filtracji, dekompozycja, normalizacja, segmentacja, okienkowanie), oraz opis metod typowych dla uczenia maszynowego – ekstrakcja cech, redukcja wymiaru i klasyfikacja. Wyniki większości swoich analiz Autor zestawia w postaci tabel i diagramów, które ułatwiają porządkowanie wiedzy.

Rozdziały 4–8, najistotniejsze moim zdaniem w części teoretycznej, to systematyczna i szczegółowa analiza metod wykorzystywanych przez Autora w procesie przetwarzania, analizy i klasyfikacji danych, z podziałem na pre-processing, analizę w dziedzinie czasu, częstotliwości, dziedzinie czasowo-częstotliwościowej, kończąc na redukcji wymiaru i klasyfikacji. Rozdział ten ukazuje mechanizmy tkwiące w poszczególnych podejściach i ich powiązanie z uzyskiwanymi wynikami. Rozdziały te stanowią bardzo cenną część pracy, dającą odpowiednie tło do dalszych rozważań i działań o charakterze praktycznym.

Rozdziały 9–13 zawierają kluczowe dla pracy wyniki przeprowadzonych poczynąń, odwołujących się do dobrze już zilustrowanego wcześniej łańcucha przetwarzania, analizy i klasyfikacji danych. Wyniki badań numerycznych ilustrowane są w postaci starannych wykresów i diagramów i prowadzą do istotnych wniosków. Najbardziej informatywne i różnorodne cechy reprezentujące badane sygnały (łącznie 110) wyodrębniono przy użyciu algorytmu MRMR. Spośród 11 przetestowanych algorytmów klasyfikacyjnych, najlepsze rezultaty pod względem dokładności klasyfikacji osiągnięto przy użyciu Liniowej Maszyny Wektorów Nośnych (LSVM).

Rozprawę kończą: podsumowanie wraz krytyczną analizą uzyskanych wyników i wskazaniem kierunków dalszych badań, bibliografia oraz załączniki.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Analiza stanu wiedzy

Autor dokonał starannego rozeznania literaturowego w wielu obszarach powiązanych tematycznie z dziedziną pracy, tj. metod badania stawu kolanowego, doniesień naukowych na temat zastosowań metody wibroartrograficznej w badaniach stawów, zagadnień dotyczących modelowania i analizy matematycznej sygnałów pomiarowych, oraz algorytmów uczenia maszynowego. Wykaz literatury zamieszczony w dysertacji zawiera 186 pozycji w postaci

książek i artykułów naukowych, w większości wydane w ostatnim dziesięcioleciu, co świadczy o aktualnym stanie wiedzy, którą posługuje się Autor. Analiza literatury została przeprowadzona rzetelnie.

Metodyka pracy

Metodyka pracy jest prawidłowa. Obejmuje identyfikację i opis problemu badawczego, elementy rozeznania literaturowego i uporządkowania wiedzy w obszarach związanych z tematyką pracy badawczej, przeprowadzenie wielodzielnych analiz zarejestrowanych sygnałów, prace symulacyjne, krytyczną analizę wyników ich upowszechnienie, oraz końcowe wnioski.

Niewątpliwie metodyka ta przyczyniła się do uzyskania wartościowego rozwiązania postawionego problemu badawczego: określenia najbardziej optymalnego (tj. informatywnego) zestawu cech oraz wybór algorytmu maszynowego, który umożliwił rozwiązanie problemu klasyfikacji z zadowalającą dokładnością.

Uznanie budzą umiejętności Autora w zakresie metod i procedur analizy matematycznej sygnałów pomiarowych. Wysoko oceniam również znajomość systemów eksperckich, zwłaszcza w kontekście wyciągniętych wniosków.

Oryginalność rozwiązania problemu naukowego

Oryginalność naukową recenzowanej pracy cechuje zarówno jakość uzyskanych wyników, które mają charakter poznawczy i użyteczny, jak i metody i narzędzia badawcze, którymi Autor się posługiwał. **Do oryginalnych cech recenzowanej pracy zaliczam:**

- i) **wykazanie możliwości klasyfikacji wybranych schorzeń i zwyrodnień stawu kolanowego na podstawie analiz sygnałów wibroartrograficznych w dziedzinach czasu, częstotliwości i czasowo-częstotliwościowej;**
- ii) **wskazanie optymalnego (najbardziej informatywnego) zakresu częstotliwości widma sygnału pomiarowego;**
- iii) **systematyczną analizę danych pomiarowych, obejmującą parametryzację sygnału pomiarowego, optymalizację cech parametrycznych oraz wybór najbardziej informatywnego zestawu cech;**
- iv) **wskazanie algorytmu uczenia maszynowego, umożliwiającego rozwiązywanie problemu klasyfikacji z lepszym rezultatem niż dotychczas opracowane modele.**

Oryginalność wkładu w dyscyplinę *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne* dokumentują publikacje współautorstwa Pana mgr inż. Adama Łysiaka zamieszczone w bibliografii. Są to: **3** artykuły w międzynarodowych periodykach z listy JCR (*Sensors*, IF = 3.9, *IEEE Access*, IF = 3.9) oraz **1** artykuł w innym czasopiśmie międzynarodowym. We wszystkich pracach Doktorant jest pierwszym autorem. W bazie *Web of Science* indeksowanych jest **8** publikacji współautorstwa Pana Adama Łysiaka.

Redakcja rozprawy

Praca napisana została napisana ładnym językiem angielskim z minimalną ilością niedociągnięć edytorskich. Treść jest przystępna i precyzyjna, układ logiczny, dobrze odzwierciedlający metodykę przeprowadzonych badań. Atutem są czytelne rysunki oraz różnego rodzaju diagramy, które znacząco ułatwiają zrozumienie przedstawianych zagadnień i weryfikację formułowanych wniosków. Wielkość czcionki stosowanej do opisu niektórych rysunków mogłaby być jednak nieco większa. Pomocny w lekturze pracy jest wykaz użytych oznaczeń, a także informacje zawarte w dodatkach. Mocnym punktem pracy jest systematyczny opis użytych metod (Rozdz. 4–8).

4. Wartościowe elementy dysertacji

Do najsilniejszych stron pracy zaliczam:

- i) prawidłowo zidentyfikowany obszar i problem badawczy z zakresu dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne;
- ii) poprawnie sformułowaną hipotezę badawczą;
- iii) poprawną metodykę badań;
- iv) bardzo szeroki zakres przeprowadzonych prac, obejmujący przetwarzanie sygnałów pomiarowych i elementy uczenia maszynowego w badaniach 184 pacjentów obciążonych schorzeniami i zwyrodnieniami stawu kolanowego;
- v) wysoki poziom analiz w dziedzinach czasu, częstotliwości, i dziedzinie czasowo-częstotliwościowej;
- vi) trafną selekcję najbardziej informatywnego zestawu cech oraz dobór algorytmu uczenia maszynowego, który umożliwił rozwiązywanie problemu klasyfikacji z zadowalającą dokładnością i udowodnienie tezy pracy.

5. Uwagi krytyczne, zagadnienia do dyskusji

Dysertacja doktorska mgr inż. Adama Łysiaka wymaga kilku dodatkowych komentarzy. Poniżej zamieszczam najważniejsze z nich.

- i) Oś tezy badawczej oparta jest na efektach klasyfikacji uzyskanej przez innych Autorów (Kręcis i Bączkiewicz, 2017). Dlaczego Autor nie odnosi własnych wyników klasyfikacji do innych prac¹?
- ii) Opis badań i ich warunków (Str. 10) jest – w mojej opinii – dość skromny. Brakuje informacji na temat np. płci, wieku, wagi i wzrostu osób poddanych badaniom. Czy Autor rozważał możliwość uwzględnienia tej dodatkowej wiedzy o pacjencie i wpływ tej wiedzy na wyniki klasyfikacji?
- iii) Proszę o uzasadnienie, dlaczego ewaluacja efektywności algorytmów klasyfikacji dotyczyła takiego parametru jak dokładność (*Accuracy*)? Czy inne metryki, które wydają się adekwatne do rozważanego problemu, takie jak specyficzność

¹ Np. Kim K.S., Seo J.H., Song C.G. "Classification of normal and abnormal knee joint using back-propagation neural network" Proceedings of the 2008 International Conference on Bioinformatics and Computational Biology, BIOCOMP 2008, Pages 483-488.

(*Specificity / True Negative Rate*) czy czułość (*Sensitivity / True Positive Rate*) wniosłyby dodatkowe informacje na temat tej ewaluacji?

- iv) Pewnym niedociągnięciem jest niewystarczające przedstawienie informacji na temat algorytmicznej implementacji wykorzystanych metod, np. algorytmów uczenia maszynowego (w jakim języku były one pisane, ile wynosił czas przetwarzania danych, etc. ?).

6. Wnioski końcowe

Dokonując ogólnej oceny stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska mgr inż. Adama Łysiaka jest pracą wartościową, stojącą na wysokim poziomie naukowym. Zawartość dysertacji wskazuje, że została ona wykonana w obszarze dyscypliny naukowej *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*.

Praca zawiera szereg wymienionych wcześniej elementów oryginalnych. Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne nie dotyczą zasadniczych walorów merytorycznych i tym samym nie pomniejszają wartości naukowych osiągnięć.

Cele pracy zostały osiągnięte, a postawiona na wstępie teza badawcza udowodniona. Przyjęta metodyka badań, zakres prac oraz uzyskane wyniki świadczą o pracowitości, zaangażowaniu, kreatywności i umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych przez Autora.

Biorąc pod uwagę powyższą ocenę dysertacji, wykazującą oryginalność rozwiązania postawionego problemu naukowego stwierdzam, że praca doktorska pt. „Automatic Diagnosis of the Patient’s Knee Joint Using Selected Methods of Vibroarthrographic Signal Analysis” spełnia wymagania wynikające z przepisów ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz.U z 2023 r. poz.742), w związku z czym **wnoszę o dopuszczenie Adama Łysiaka do publicznej obrony przedłożonej pracy**. Ponadto, ze względu na nowatorski charakter prac, znakomity warsztat naukowy Autora potwierdzony bardzo szerokim zakresem przeprowadzonych analiz i poczynąń empirycznych, a także dorobek publikacyjny Autora związany z tematyką dysertacji, **wnoszę o wyróżnienie rozprawy**.

Gregorz Śrimalch