

Łódź, 4 września 2024 r.

prof. dr hab. inż. Michał Strzelecki  
Instytut Elektroniki Politechniki Łódzkiej  
ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź  
michal.strzelecki@p.lodz.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Aleksandry Badury  
**„Opracowanie systemu rejestracji i analizy danych medycznych w monitorowaniu  
natężenia dolegliwości bólowych w procedurach fizjoterapeutycznych”**  
promotor prof. dr hab. inż. Ewa Piętka

Podstawą niniejszej recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna Politechniki Śląskiej z 11 lipca 2024 r. powołująca mnie na recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia doktora mgr inż. Aleksandrze Badurze, prowadzonym w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria biomedyczna.

Automatyczne wykrywanie bólu oraz jego natężenia u pacjentów podczas fizjoterapii jest niezwykle istotne z wielu powodów. Prowadzi do zmniejszenia ryzyka kontuzji poprzez dostosowanie intensywności terapii do aktualnego stanu zdrowia pacjenta, może zapobiec pogłębianiu bólu i uszkodzeniom tkanek lub rehabilitowanych narządów. Umożliwia także optymalizację procesu rehabilitacji dzięki indywidualizacji terapii poprzez dostosowanie ćwiczeń lub działań manualnych do poziomu odczuwalnego bólu. Stąd rozwój metod umożliwiających detekcję bólu jest bardzo ważnym i aktualnym wyzwaniem badawczym. W ten właśnie obszar wpisuje się recenzowana rozprawa, której celem jest zbudowanie systemu do akwizycji, przetwarzania i analizy różnorodnych danych biomedycznych, których źródłem jest osoba podlegająca zabiegowi fizjoterapii w celu wykrycia dolegliwości bólowych. Takie zagadnienia badawcze nie są bardzo szeroko eksploatowane i opisywane w literaturze, zatem uzyskane wyniki badań Autorki rozprawy stanowią oryginalny i ciekawy wkład w rozwój

projektowania i tworzenia systemów detekcji bólu. W rozprawie sformułowano poprawnie następującą tezę:

**Wykorzystanie cech wybranych sygnałów biomedycznych pozwala na detekcję wystąpienia bólu podczas terapii manualnej.**

Rozprawa została podzielona na 7 rozdziałów oraz 3 dodatki. W dodatkach przedstawiono kolejno walidację dynamometru wykorzystywanego przez pacjentów do określania natężenia bólu, wyniki dopasowania liniowych modeli mieszanych (jako uzupełnienie rozdziału 7) oraz wartości cech biomedycznych uzyskanych dla danych eksperymentalnych oraz klinicznych. Pierwszy rozdział ma charakter wprowadzający w tematykę rozprawy, zawiera omówienie problemu badawczego, przedstawia aktualny stan wiedzy w zakresie metod detekcji bólu oraz ogólnodostępne bazy danych umożliwiające weryfikację tych metod. Poprawnie zidentyfikowano także luki w stanie wiedzy w tej dziedzinie, co stanowi uzasadnienie dla podjęcia zaplanowanych w rozprawie badań. Rozdział 2 przedstawia cele i tezę rozprawy.

Rozdział 3 prezentuje autorski system pomiarowy opracowany w ramach projektu PainMonit do rejestracji danych biomedycznych podczas zabiegów fizjoterapii, który składa się z bezprzewodowych urządzeń pomiarowych oraz komputera i oprogramowania z graficznym interfejsem użytkownika. System rejestruje wybrane sygnały fizjologiczne (EDA, BVP, RSP, EMG), nie ograniczając przy tym swobody ruchów pacjenta ani zakresu fizjoterapii. Dane są synchronizowane i wyświetlane w czasie rzeczywistym, co pozwala na monitorowanie jakości sygnałów. System umożliwia również rejestrację bólu w skali NRS oraz zapis danych w typowych formatach CSV oraz MP4.

W rozdziale 4 opisano trzy bazy danych wykorzystywane podczas badań: dwie uzyskane podczas sesji fizjoterapeutycznych oraz jedną utworzoną podczas badań eksperymentalnych. Sesje kliniczne odbyły się w Specjalistycznym Centrum Fizjoterapii i Rehabilitacji w Rybniku, uzyskano na ich przeprowadzenie zgodę komisji bioetycznej. Terapia powięziowa karku i szyi obejmowała 49 pacjentów (28 kobiet, 21 mężczyzn) w wieku 20–70 lat. Podczas terapii mierzono ból pacjentów przy użyciu skali NRS, a przebieg sesji został zarejestrowany. Terapia stawu skroniowo-żuchwowego obejmowała 24 pacjentów (20 kobiet, 4 mężczyzn) w wieku 15–62 lat, w tym 12 ze zdiagnozowaną dysfunkcją stawu. Do oceny bólu użyto odpowiednio skalibrowanego dynamometru, co jest ciekawym i oryginalnym pomysłem Doktorantki. Eksperymentalna baza danych PainMonit obejmowała 50 zdrowych osób (30 kobiet, 20 mężczyzn), u których przeprowadzono stymulację termiczną (z użyciem termody) wraz z rejestracją odczuć bólowych za pomocą urządzenia CoVAS. Podczas badań rejestrowano sygnały EMG, EDA, RSP i BVP wykorzystując system Empatica E4.

Rozdział 5 rozprawy dotyczy analizy danych biomedycznych za pomocą modelu uczenia maszynowego, wykorzystującego technikę Adaptive Boosting (AdaBoost). Głównym celem prac było zbadanie, jak wybrane sygnały biomedyczne mogą być użyteczne w rozpoznawaniu bólu podczas fizjoterapii. Dane obejmowały sygnały EDA, BVP, EMG i RSP, zarejestrowane przy użyciu urządzenia biosignalsplux. Omówiono szczegółowo etapy przetwarzania wstępnego poszczególnych sygnałów, w tym eliminację artefaktów i ich segmentację na krótkie okna czasowe. Następnie poszczególne ramki były etykietowane na podstawie poziomu bólu deklarowanego przez pacjentów. Do oceny poziomów bólu wykorzystano cechy analizowanych sygnałów uzyskane za pomocą rozproszonej transformaty falkowej (WST) oraz wybranych parametrów statystycznych. Przeprowadzono szereg eksperymentów (klasyfikacje

binarne dla rozróżnienia bólu o różnym natężeniu od braku bólu), m.in. dla różnych parametrów modelu oraz dla wybranych optymalnych cech. Porównano także model AdaBoost z innymi klasycznymi modelami uczenia maszynowego (kNN, SVM). Przedstawiono również analizę otrzymanych wyników, potwierdzając skuteczność zaproponowanej metody w rozpoznawaniu bólu na podstawie wybranych sygnałów biomedycznych.

W rozdziale 6 opisano przeprowadzone eksperymenty analizy pozyskanych danych biomedycznych z wykorzystaniem modelu uczenia głębokiego Long Short-Term Memory (oraz jego wariantu dwukierunkowego biLSTM), który został użyty do klasyfikacji sygnałów fizjologicznych. Przeprowadzono badania dla różnych konfiguracji sieci, w tym z dodatkowymi warstwami dropout, które minimalizują ryzyko nadmiernego dopasowania modelu do danych treningowych. W celu oceny skuteczności modeli, podobnie jak w rozdziale poprzednim, wykorzystano typowe metryki używane do określania jakości modeli ML. Uzyskane wyniki pokazały, że architektura biLSTM+ (z dodatkową warstwą LSTM i dropout) osiąga najlepsze rezultaty wykrywania bólu (klasyfikacja binarna: brak bólu – ból), z dokładnością na poziomie 88% i współczynnikiem F1 wynoszącym 0,88. W badaniach porównano także inne modele, takie jak AdaBoost, który wykazał niższą efektywność (ACC=0,70). Zidentyfikowano również optymalne wartości hiperparametrów, (m.in. współczynnik szybkości uczenia, liczba jednostek ukrytych), które miały kluczowe znaczenie dla efektywności modelu. Eksperymenty potwierdziły, że modele oparte na architekturze biLSTM+ najlepiej radzą sobie z analizą danych, zarówno w modelu eksperymentalnym jak i klinicznym.

Rozdział 7 omawia wyniki analizy statystycznej danych z dwóch modeli, eksperymentalnego i klinicznego, przeprowadzonej z użyciem liniowych modeli mieszanych. Uwzględniono indywidualne i grupowe różnice w reakcjach na ból, co umożliwiło dokładniejszą ocenę wpływu bólu, stanu zdrowia oraz rodzaju bodźca bólowego na cechy sygnałów biomedycznych. Badanie obejmowało dwa etapy: analizę danych klinicznych oraz połączonych danych klinicznych i eksperymentalnych. Wykazano, że rodzaj przeprowadzonego eksperymentu wpływa na wyznaczone cechy, co wskazuje na różnice w reakcjach fizjologicznych pacjentów na stosowane podczas terapii bodźce: termiczny i mechaniczny. Wyniki pokazały również istotny wpływ bólu lub jego braku na zmienność sygnałów EDA (dane eksperymentalne) i BVP (dane kliniczne). Doktorantce należą się wyrazy uznania za przeprowadzenie analiz statystycznych, ponieważ ten aspekt jest często pomijany w badaniach związanych z analizą danych biomedycznych. Jest natomiast bardzo ważny z punktu widzenia możliwości potwierdzenia wiarygodności oraz istotności uzyskanych wyników.

W rozdziale 8 zawarto szczegółową i krytyczną dyskusję otrzymanych wyników, porównano je z podobnymi wynikami opublikowanymi przez innych badaczy, przedstawiono ograniczenia opracowanych metod oraz poprawnie sformułowano wnioski z uzyskanych wyników badań. Rozdział 9 stanowi podsumowanie rozprawy, wykazano w nim realizację zdefiniowanych w rozdziale 2 celów naukowych.

Liczący 141 pozycji wykaz literatury obejmuje najważniejsze pozycje literatury światowej dotyczące tematyki związanej z rozprawą. Przedstawiono w nim również dwie publikacje współautorskie zamieszczone w materiałach międzynarodowej konferencji ITIB. Ponadto Doktorantka jest współautorką bezpośrednio związanej z tematyką rozprawy publikacji w czasopiśmie Sensors, która jest rozpoznawalna środowisku międzynarodowym (11 cytowań wg bazy Scopus, sierpień 2024).

Podsumowując merytoryczną ocenę rozprawy stwierdzam, że Doktorantka osiągnęła założone cele badawcze oraz udowodniła postawioną tezę dzięki opracowaniu systemu detekcji odczuć bólowych. Wszystkie opisane w rozprawie badania zaplanowano i zrealizowano poprawnie, co było znaczącym wyzwaniem ze względu na konieczność akwizycji danych biomedycznych od pacjentów w trakcie wykonywanych procedur fizjoterapeutycznych. Opracowane i przedstawione metody analizy danych poddano wyczerpującej dyskusji i zidentyfikowano ich ograniczenia, co świadczy o dojrzałości Autorki rozprawy. Należy podkreślić, że dla osiągnięcia celów pracy mgr Aleksandra Badura musiała się wykazać szeroką wiedzą z nie tylko z dyscypliny inżynieria biomedyczna, jak również umiejętnościami inżynierskimi niezbędnymi do zaprojektowania i zbudowania stanowisk do akwizycji sygnałów. Do najważniejszych osiągnięć Doktorantki pracy zaliczam:

1. Opracowanie, implementację oraz walidację metody detekcji i klasyfikacji bólu podczas terapii powięziowej okolic karku i szyi z wykorzystaniem wybranych i odpowiednio przetworzonych danych biomedycznych oraz modelu uczenia maszynowego AdaBoost.
2. Opracowanie, implementację oraz walidację i implementację metody wykrywania bólu umożliwiającą ciągłą analizę biosygnałów zarejestrowanych podczas terapii okolic stawu skroniowo-żuchwowego z użyciem zoptymalizowanej architektury sieci biLSTM+, trenowanej dla różnych zestawów danych oraz z użyciem transferu wiedzy pomiędzy wzorcami uzyskanymi podczas eksperymentalnej stymulacji termicznej i pochodzącymi z terapii manualnej.

Praca jest napisana poprawnym językiem, nie budzi również zastrzeżeń od strony redakcyjnej.

Lektura pracy nasuwa również kilka przedstawionych poniżej pytań oraz uwag do dyskusji.

1. W rozdziale 5 wydajność modelu AdaBoost porównywano tylko z dwoma klasyfikatorami, co budzi pewien niedosyt. Skąd się wzięło to ograniczenie i dlaczego w zestawie klasycznych modeli brakło sieci perceptronowej, zwykle bardzo skutecznej w różnych zadaniach klasyfikacji?
2. Proszę o dokładniejsze wyjaśnienie metod przygotowania sekwencji „centralnej” i „okna przesuwne” oraz o uzasadnienie potrzeby użycia obydwu metod (opisanych w rozdziale 6).
3. Przedstawione wyniki badań dotyczyły różnych wariantów klasyfikacji binarnej, niezależnie od rodzaju modelu. Czy próbowano zbudować klasyfikator różnicujący stopnie bólu, ewentualnie czy możliwe jest dostosowanie opracowanych metod dla uzyskania ciągłej skali natężenia bólu?
4. Czy opracowane metody oraz uzyskane wyniki były konsultowane ze środowiskiem fizjoterapeutów pod kątem ich zastosowania w praktyce klinicznej?

Wszystkie moje uwagi dyskusyjne w żadnym stopniu nie wpływają na jednoznacznie pozytywną ocenę recenzowanej pracy. Stwierdzam, że praca „Opracowanie systemu rejestracji i analizy danych medycznych w monitorowaniu natężenia dolegliwości bólowych w procedurach fizjoterapeutycznych” spełnia z nadmiarem wymagania stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z ustawą Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. z

późniejszymi zmianami. W związku z powyższym wnioskuję o przyjęcie tej rozprawy i dopuszczenie mgr inż. Aleksandry Badury do publicznej obrony.

Jednocześnie ze względu na istotny wkład, jaki w mojej opinii wnoszą opracowane przez Doktorantkę oryginalne systemy detekcji bólu umożliwiające akwizycję, przetwarzanie i analizę wybranych sygnałów biomedycznych wnoszę o wyróżnienie rozprawy.

Podpisał Michał Strzelecki (podpis odręczny)

