

Prof. dr hab. inż. Khalid Saeed
Wydział Informatyki
Politechnika Białostocka
ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok
Tel. (+48-85) 746 9196
k.saeed@pb.edu.pl

Białystok, 2.06.2025 r.

RECENZJA rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Muhammada Farhana Safdara

z Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych
Politechniki Warszawskiej
zatytułowanej *Developing Algorithms Using Artificial Intelligence
to Analyze Electrocardiogram Signals*

Promotor:

dr hab. inż. Robert Nowak, prof. PW
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Politechnika Warszawska

Niniejszą recenzję przygotowałem na zlecenie zawarte w piśmie z dnia 7.04.2025, które otrzymałem od profesora Jarosława Arabasa przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja Politechniki Warszawskiej na podstawie uchwały Rady nr 29/2025 z dnia 18.03.2025.

I. Omówienie zawartości rozprawy

Celem pracy doktorskiej mgr. inż. Muhammada Farhana Safdara było analiza i zaprezentowanie skutecznych metod wstępnego przetwarzania sygnałów elektrokardiograficznych (EKG) oraz udoskonalonej architektury modelu spłotowych sieci neuronowych. Autor przedstawia rozprawę doktorską jako serię publikacji o systemach wykorzystujących głębokie uczenie do badania sygnału EKG. Publikacje to jeden referat konferencyjny oraz cztery artykuły w czasopiśmie - jeden z nich nie był (i chyba nadal nie jest) opublikowany, o czym pisze sam doktorant (cytuje: *The thesis is structured into five thematic scientific contributions, consisting of four published articles and one currently submitted at a peer reviewed journal*). Nie jestem pewien, czy jest to dobry wybór, ponieważ artykuł mógłby zostać zrecenzowany negatywnie lub wymagałby ważnych zmian, a autor potraktował go jako jeden z ważnych elementów swoich osiągnięć naukowych, na podstawie którego były budowane dalsze etapy pracy. Niemniej w mojej recenzji będę traktował materiał rozprawy jako „Thesis work”, a nie „Thematic series of publications” - chodzi przede wszystkim o ewaluację pracy doktoranta, którą oceniam pozytywnie.

Podjęta tematyka pana Muhammada Safdara jest ważnym wyzwaniem dla badaczy naukowych zajmujących się komputerową analizą sygnałów EKG. Doktorant znalazł trafną lukę w literaturze i stanie wiedzy, którą uzupełnił z sukcesem - uzyskał skuteczne algorytmy, dzięki którym można osiągnąć metody wysokiej wydajności w automatycznej klasyfikacji diagnostycznej sygnałów EKG. Pan Muhammad zastosował sprawne metody wstępnego przetwarzania i usprawnionej architektury modelu CNN.

Rozprawa ma charakter teoretyczno-doświadczalny i zawiera 71 stron. Praca została podzielona na siedem rozdziałów, bibliografię oraz dwa dodatki - listę symboli i kopie publikacji autora.

Rozdział pierwszy, jako wprowadzenie do rozprawy, poświęcony jest głównie informacji o wkładzie autora w stan wiedzy na temat analizy sygnałów EKG prezentowany przez pięć artykułów. Autor podaje swoje najważniejsze osiągnięcia naukowe, które zostały opublikowane i stworzą podstawę rozprawy.

W rozdziale drugim doktorant podaje historię pomysłu sygnału EKG i jego konstrukcji, użyte w pracy modele matematyczne oraz opis metod DL w analizie sygnałów EKG. W tym rozdziale autor podał motywację i tezę pracy, które zostały szczegółowo przestudiowane w artykułach P.1 do P.5.

W rozdziale trzecim rozprawy omówiono systematyczny przegląd przetwarzania sygnału EKG. Autor podał informację o repozytoriach danych oraz diagnostycznej sztucznej inteligencji w badaniu sygnału EKG.

W rozdziale czwartym autor omówił kwestię wyodrębniania i filtracji niepożądanych częstotliwości oraz podał informację o spektrogramach i metodach walidacji eksperymentów przy eliminacji niewykorzystanych częstotliwości.

Rozdział piąty był poświęcony wzbogacaniu danych sygnału EKG dla potrzeb metod głębokiego uczenia. Autor wyjaśnia stosowane algorytmy augmentacji danych służące temu celowi. Podaje również informacje o walidacji stosowanych metodologii oraz ważną informację o opisie P-QRS-T na sygnałach EKG stosowanych w artykułach.

W rozdziale szóstym autor przedstawia opracowane metodologie translacyjne w adaptacji danych klinicznych z 12. odprowadzeń na SL-ECG (*Single Lead ECG*). Wnioski końcowe oraz konkluzje są podane w dwustronnym rozdziale siódmym w sposób dyskusyjny - jako pytania i odpowiedzi. Całość pracy zamyka bibliografia, która zawiera 93 pozycje.

Struktura i zawartość rozprawy pokazują analizę publikacji doktoranta.

II. Opis zawartości publikacji – ocena pracy

Informacje o artykułach i ich zawartościach podam według kolejności wybranej przez autora – P.1-P.5. We wszystkich artykułach pan Muhammad jest pierwszym współautorem z udziałem 70%.

P.1: *Pre-processing techniques and artificial intelligence algorithms for electrocardiogram signals analysis: A comprehensive review. Computers in Biology and Medicine, Elsevier, 2024. IF=7.0, 100 pkt MNiSW.*

Jest to bardzo dobra i obszerna praca przeglądowa, zawierająca 232 pozycje: artykuły w czasopismach oraz materiały konferencyjne. Omówiono różne aspekty dotyczące sygnału EKG, w tym wstępne przetwarzanie, wzbogacanie danych urządzenia EKG do noszenia, rolę metod uczenia maszynowego i głębokiego uczenia w analizie sygnałów i modelowaniu opartym o agentach.

P.2: *Denoising and Fourier Transformation-based Spectrograms in ECG Classification using Convolutional Neural Network*. *Sensors*, MDPI, 2022. IF=3.4, 100 pkt MNiSW.

Nowością pracy jest użycie spektrogramów zamiast surowych sygnałów. Spektrogramy można łatwo zredukować, eliminując częstotliwości bez informacji EKG. Redukcja danych została przeprowadzona poprzez filtrację częstotliwości, przyjmując określoną wartość odcięcia. Te kroki sprawiają, że architektura modelu CNN jest prosta, co wykazało wysoką dokładność. Proponowane podejście zmniejszyło użycie pamięci i moc obliczeniową dzięki nieużywaniu złożonych modeli CNN. Najwyższą dokładność klasyfikacji i identyfikacji chorób serca, wynoszącą 99,06%, osiągnięto dzięki proponowanemu przez autora podejściu polegającemu na wnioskowaniu, iż spektrogramy są lepsze niż surowe sygnały do klasyfikacji EKG.

P.3: *A Novel Data Augmentation Approach for Enhancement of ECG Signal Classification*. *Biomedical Signal Processing and Control*. IF=4.9, 140 pkt MNiSW.

W tym artykule autor zaproponował algorytm augmentacji danych w celu ulepszenia zestawu danych sygnałów EKG o małej objętości oraz zarządzanie problemami nierówności danych (data imbalance). Prezentowana metodologia ma na celu zwiększenie klas mniejszościowych o niższym podobieństwie strukturalnym, ale wysokim podobieństwie cech między próbkami syntetycznymi i oryginalnymi. Nowością proponowanej metody jest wprowadzenie unikalnego rozszerzenia danych dla szeregów czasowych sygnałów EKG, które opiera się na prostej segmentacji, a następnie ponownym ich uporządkowaniu.

P.4: *Enhanced Framework for Single Lead Electrocardiogram Signal Analysis Using Deep Learning with 12-Lead Data*. Złożony do Submitted to *Biomedical Signal Processing and Control*.

Tak jak podałem powyżej, praca była złożona, a nie ma informacji o jej przyjęciu. Niemniej zawartość artykułu jest ciekawa i synchronizuje z pozostałymi artykułami. Autorzy proponowali nowatorskie podejście do rozwiązywania problemu niedoboru danych *Single Lead ECG* (SL-ECG) poprzez szczegółowe badanie 12-odprowadzeniowych baz danych klinicznych i wprowadzenie architektury wstępnego przetwarzania, która przekłada dane SL-ECG, zapewniając jednocześnie zgodność z danymi 12-odprowadzeniowymi. W pracy autorzy określają wiarygodność izolowanych odprowadzeń klinicznego EKG do treningu modelu DL dla określonego celu. Potem zastosują segmentację przedłużonego jednokanałowego sygnału EKG w celu rozwiązywania problemu pamięci.

P.5: *Optimizing Electrocardiogram Signal Augmentation for Realistic Synthetic Data in Deep Learning Model*. *Signal Processing Algorithms, Architectures, Arrangements and Applications* (SPA-2024 - konferencja IEEE Xplore).

W tym referacie autorzy zaproponowali nowe podejście do rozszerzania (augmentacji) sygnałów EKG, mające na celu wytwarzanie realistycznych sygnałów przy jednoczesnej optymalizacji wykorzystania pamięci i wymagań dotyczących zasobów. Metodologia opiera się na poprzednich pracach autorów nad rozszerzaniem sygnału EKG. Doktorant i jego zespół głównie zajmowali się ograniczeniami zaobserwowanymi w generowaniu sygnałów syntetycznych. Autorzy twierdzą, że ich algorytmy osiągnęły bardzo dobre wyniki, które podkreślają skuteczność i wydajność ich metody w zakresie zwiększania sygnałów EKG dla różnych zastosowań w opiece zdrowotnej i badaniach biomedycznych.

Artykuły stanowią oryginalne i ważne rozwiązanie problemu analizy i przetwarzania sygnałów EKG oraz wkład własny doktoranta w rozwój metod wstępnego przetwarzania sygnałów EKG. Przykładowe podejścia innych autorów w ramach stanu wiedzy zostały wybrane umiejętnie, a w szczególności w artykule P.1, gdzie analizowano ponad 200 prac naukowych. Wyniki eksperymentów autora wykazały, że przedstawiona metodologia zajmuje znaczące miejsce w stosunku do innych znanych metod pod względem uzyskiwanych wyników komputerowych badań sygnałów EKG, od akwizycji sygnału do klasyfikacji i rozpoznawania rodzaju chorób serca. Należy uznać, że autor wykazał w swoich artykułach, w ramach rozprawy doktorskiej, dobrą znajomość technik analizy sygnałów EKG i z sukcesem zrealizował wszystkie założone cele podane w rozprawie jako „Thesis contributions”.

Reasumując, należy uznać, że rozprawa napisana poprawnie, zaś istotne dla tematyki pracy zagadnienia zostały omówione w artykułach i opisane przez autora w rozprawie doktorskiej wyczerpująco. Wybrane metodologie i narzędzia są istotne, dokładne i niezbędne do osiągnięcia celu manuskryptu. Rozprawa napisana w języku angielskim, czyta się ją dobrze, chociaż nie brakuje błędów gramatycznych lub edytorskich. Nie zauważyłem poważnych braków merytorycznych, jednak są pewne aspekty, które wymagają dyskusji. Nie znalazłem istotnej informacji na temat badania sygnału EKG w sytuacji przed/po zawałowej w ilustracjach w rozprawie ani w artykułach. Tu chodzi o kształt sygnału, który na przykład pokazuje bardzo niski poziom Q (1-2 dni po zawale) lub odwrócone T (kilka dni po zawale), itd. Czy takie kształty odbiegające od typowego sygnału były przeanalizowane i jaki miały wpływ na pracę opracowanych algorytmów? Chciałbym, aby autor ustosunkował się do tych uwag podczas obrony pracy doktorskiej.

III. Merytoryczne osiągnięcia doktoranta

Opublikowane prace są dobrym dowodem na to, że doktorant znalazł własną pozycję w stanie wiedzy. Pan Muhammad Safdar odkrył lukę w literaturze i wypełnił ją wynikami swoich prac naukowych. Stosowanie metod AI – jako metodologie sztucznej inteligencji wymaga zarówno dużych danych (*big data*), jak i dużej przestrzeni systemowej do pracy nad zebranymi danymi. Nie zawsze taka pamięć lub przestrzeń jest dostępna w narzędziach i systemach do wstępnego przetwarzania. Dlatego też pokonanie tego problemu jest

wyzwaniem. Doktorant opracował nowe metody technik wstępnego przetwarzania w taki sposób, aby można było przekształcić surowe sygnały EKG w formę o mniejszej pamięci bez utraty cech klasyfikacji pacjentów lub informacji o danych EKG. Autor zrealizował cele pracy i opracował następujące algorytmy i nowatorskie metody:

- Istotny przegląd analizy sygnałów elektrokardiogramu (EKG), od klasycznych do zaawansowanych technik, z naciskiem na uczenie maszynowe (ML) i głębokie uczenie (DL).
- Wykorzystanie surowych sygnałów EKG do spektrogramów w celu redukcji rozmiaru danych, które wymagają mniej pamięci i obliczeń w klasyfikacji chorób poprzez proponowany czterowarstwowy model CNN.
- Wprowadzenie unikalnego algorytmu augmentacji danych dla szeregów czasowych danych sygnału EKG, który opiera się na segmentacji i reorganizacji sygnału.
- Proponowanie i zademonstrowanie udoskonalonej wersji algorytmu augmentacji, która wykorzystuje i zutylizuje wykrywanie szczytów R przed segmentacją w celu generowania bardziej realistycznych próbek.
- Opracowanie modelu do rozróżnienia optymalnych odprowadzeń z 12-kanalowych sygnałów EKG na podstawie oceny predykcyjnej skuteczności jednoprzewodowego EKG przy użyciu wytrenowanych modeli DL.

Do implementacji algorytmów autor używał głównie Pythona z Jupyter Notebook i Net Logo.

Metodologie i narzędzia są istotne, dokładne i niezbędne do osiągnięcia celu pracy oraz rozwiązywania problemów analizy sygnałów EKG. Według mojej oceny uważam, że mgr inż. Muhammad Farhan Safdar osiągnął wyznaczony cel rozprawy doktorskiej, która wnosi nowe aspekty do nauk inżynierijno-technicznych.

IV. Wnioski końcowe

Wystawiam ocenę pozytywną rozprawie doktorskiej mgr. inż. Muhammada Farhana Safdara pt. "Developing Algorithms Using Artificial Intelligence to Analyze Electrocardiogram Signals" oraz stwierdzam, że praca spełnia wymagania i warunki nakładane przez ustawę o stopniach naukowych (art. 190 ust. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce -Dz. U. z 2024 r. poz. 1571, z późn. zm.). Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz osobisty wkład doktoranta w rozwój metod wstępnego przetwarzania sygnałów EKG oraz udoskonalonej architektury modelu splotowych sieci neuronowych. Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie autora wymienionej rozprawy doktorskiej do jej obrony w celu uzyskania stopnia doktora nauk technicznych w dziedzinie nauk inżynierijno-technicznych w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

Khalid Saeed