

prof. dr hab. inż. Dariusz Mrozek
Katedra Informatyki Stosowanej
Politechnika Śląska w Gliwicach
ul. Akademicka 16
44-100 Gliwice

RECENZJA

rozprawy doktorskiej dla
Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja
działającej w Politechnice Warszawskiej

Tytuł rozprawy: Developing Algorithms using Artificial Intelligence to Analyze Electrocardiogram Signals

Autor rozprawy: mgr inż. Muhammad Farhan Safdar

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Przedstawiona przez Pana Muhammad Farhan Safdar rozprawa doktorska składa się z cyklu powiązanych tematycznie publikacji wraz z towarzyszącym im opracowaniem (autoreferatem), który stanowi przewodnik po zrealizowanych pracach badawczych i szereguje wiedzę w omawianym obszarze. W ogólnym ujęciu rozprawa jest poświęcona przetwarzaniu i analizie sygnałów EKG z użyciem sztucznej inteligencji. Główne cele rozprawy koncentrują się wokół zagadnień reprezentacji sygnałów w procesie analizy danych EKG, ich wstępnego przygotowania, augmentacji, zrównoważenia i klasyfikacji z użyciem odpowiednio zaprojektowanych architektur sztucznych sieci neuronowych. Zarówno cele pracy, jak i motywacja prowadzonych badań w tym obszarze zostały sformułowane w sposób jasny i wyczerpujący. Charakter rozprawy określiłbym jako **eksperymentalny**, ponieważ Autor:

- zaproponował szereg usprawnień dla reprezentacji danych i ich multiplikacji, a także dla rozwiązań architektonicznych sztucznych sieci neuronowych,
- dla potwierdzenia słuszności przyjętych rozwiązań przeprowadził badania eksperymentalne na publicznie dostępnych zbiorach danych oraz danych powstałych w wyniku procesów augmentacji, które pozwoliły zweryfikować, iż opracowane algorytmy i rozwiązania mogą być z powodzeniem stosowane w analizie danych EKG i pozwalają na poprawę wydajności tych procesów analitycznych.

Lektura materiału pozwala mi stwierdzić, iż założone cele rozprawy udało się osiągnąć.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadczący o dostatecznej wiedzy Autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Analiza światowej literatury i bieżącego stanu wiedzy w omawianym obszarze zostały przeprowadzone w sposób satysfakcjonujący i świadczą o dostatecznej wiedzy Autora w tej dziedzinie. Analiza ta została przedstawiona w rozdziale 2 i 3 autoreferatu oraz w publikacji [P1] Autora, będącej elementem cyklu publikacyjnego będący głównym osiągnięciem rozprawy. Zawartość tych rozdziałów autoreferatu oraz publikacji [P1], które obejmują m.in. rys historyczny w obszarze elektrokardiografii, technik analizy sygnału EKG, technik augmentacji danych, alternatywnych rozwiązań dla klasycznych metod akwizycji sygnałów EKG w postaci urządzeń ubieralnych, analizy danych EKG z użyciem uczenia maszynowego i głębokiego, potwierdza, iż Autor posiada szeroką wiedzę w zakresie pierwotnych i bieżących trendów w zakresie tworzenia tego typu rozwiązań, a także zna ich zalety i słabości. W autoreferacie zacytowano 93, a w pracy [P1] 232 pozycje literaturowe, z których zdecydowana większość dotyczy wyżej wymienionych elementów stanu wiedzy. Rozdział 1 oraz rysunki 1-2 stanowią bardzo dobry wstęp teoretyczny do całości rozprawy, a do pojęć w nich zdefiniowanych (włączając wstęp) Autor nawiązuje w kolejnych podrozdziałach autoreferatu, jak również w treści poszczególnych artykułów głównego cyklu publikacyjnego. Szczególną uwagę zwraca Autor na problemy doboru sposobu reprezentacji danych, niskiej liczby dostępnych danych w publicznych repozytoriach dla umożliwienia budowy wiarygodnych modeli wnioskowania, niezrównoważenia zbiorów oraz dużej liczby parametrów modeli wnioskowania opartych na sztucznych sieciach neuronowych. Przeprowadzony przez Autora przegląd wiedzy w tym zakresie pozwolił mu w sposób jasny i przekonujący sformułować wnioski, które zdeterminowały przyjęcie odpowiednich rozwiązań algorytmicznych i obliczeniowych.

3. Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Na początku realizacji rozprawy Pan Muhammad Farhan Safdar zdefiniował kilka zadań, do których realizacji konsekwentnie dążył w swoich pracach badawczych. Dotyczyły one wydajnej jakościowo analizy sygnałów EKG z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych i uczenia maszynowego. W swoich pracach Autor sięgnął do rozwiązań bazujących na odpowiednio zaprojektowanych architekturach konwolucyjnych sieci neuronowych (CNN) oraz przygotowanych i przetworzonych danych przy użyciu transformaty Fouriera i transformaty falkowej. Na podstawie lektury przedłożonych prac można stwierdzić, iż postawione w rozprawie zagadnienia zostały rozwiązane w sposób właściwy. Autor osiągnął to poprzez: 1) identyfikację słabości istniejących metod analizy sygnałów EKG opartych na analizie surowych szeregów czasowych oraz zaproponowanych w literaturze metod analizy, w tym różnych architektur sztucznych sieci neuronowych, w kontekście dostępnych formatów danych i realizowanego procesu analizy, 2) opracowanie własnych usprawnień i algorytmów, 3) badania eksperymentalne weryfikujące przydatność opracowanych metod z użyciem publicznie dostępnych zbiorów danych. Wyniki przeprowadzonych przez Autora rozprawy badań potwierdziły, iż założenia przyjęte podczas opracowania autorskich metod były słuszne i uzasadnione. W artykułach stanowiących główne osiągnięcie rozprawy przedstawiono porównanie osiągniętych wyników z wynikami istniejących i popularnych narzędzi powszechnie używanych przez specjalistów prowadzących podobne analizy danych i procesy klasyfikacyjne.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Przedstawiona rozprawa stanowi bardzo dobre uzupełnienie bieżącego stanu wiedzy światowej w zakresie prowadzenia wydajnych analiz opartych na metodach sztucznej inteligencji. Pan Muhammad Farhan Safdar zaproponował własne rozwiązania w zakresie architektury konwolucyjnych sieci neuronowych, przygotowania reprezentacji danych, ich puryfikacji, odszumienia, filtracji częstotliwościowej, segmentacji sygnału EKG i re-uporządkowania segmentów, a także przeprowadził proces ich wnikliwej oceny. Na rozprawę, oprócz autoreferatu, składa się pięć publikacji – jedna w renomowanym czasopiśmie *Computers in Biology and Medicine* (IF=7.0, wydawnictwa *Elsevier*), jedna w czasopiśmie *Biomedical Signal Processing and Control* (IF=4.9, *Elsevier*), a także dwa inne artykuły opublikowane w czasopiśmie MDPI i materiałach konferencji naukowej. Wszystkie prace są ze sobą ściśle powiązane, a Pan Muhammad Farhan Safdar jest pierwszym autorem, a jego udział w powstałej pracy jest większościowy. Charakteryzując krótko zawartość przedłożonych prac P1-P5 można stwierdzić, iż:

[P1] W pracy tej przedstawiono usystematyzowany przegląd technik przetwarzania i algorytmów analizy sygnałów EKG z wykorzystaniem modeli sztucznej inteligencji. Wskazano w nim dostępne zbiory danych EKG dla prowadzonych analiz, sposoby rejestracji sygnałów EKG z uwzględnieniem dokładnych technik klinicznych i popularnych rozwiązań ubieralnych o ograniczonych możliwościach i dokładności, metod przetwarzania i multiplikacji danych, wreszcie metod analizy danych EKG powstałych w ostatniej dekadzie, ze szczególnym naciskiem na metody oparte na uczeniu maszynowym i uczeniu głębokim, podejścia hybrydowe, a także metody oparte na uczeniu transferowym (*transfer learning*). Artykuł kończy przegląd środowisk i narzędzi symulacyjnych, z naciskiem na środowiska wieloagentowe.

[P2] W pracy tej przedstawiono opartą na splotowych sieciach neuronowych (CNN) metodę klasyfikacji sygnału EKG w kontekście wykrywania zapalenia mięśnia sercowego w obrębie przegrody przedniej (ASMI). Proces trenowania został tu poprzedzony odpowiednią reprezentacją danych w postaci spektrogramu powstałego w wyniku zastosowania krótkookresowej transformaty Fouriera. W pracy przedstawiono także algorytmy przygotowania danych obejmujące procesy odszumienia i filtracji częstotliwościowej. Badania eksperymentalne przeprowadzone z wykorzystaniem zbioru PTB-XL potwierdziły, że zaproponowane rozwiązanie może konkurować z najnowocześniejszymi architekturami sztucznych sieci neuronowych, a przyjęta forma reprezentacji danych w postaci spektrogramu pozwala poprawić efektywność procesu klasyfikacji, a dodatkowo redukuje potrzebne zasoby pamięciowe.

[P3] W pracy tej przedstawiono metodę augmentacji danych EKG opartą na segmentacji sygnału i relokacji fragmentów szeregu czasowego, tworząc w ten sposób nowy przebieg sygnału EKG o niskim podobieństwie strukturalnym w stosunku do przebiegu pierwotnego, ale zachowujący kluczowe jego cechy. Ponownie, jako danych wejściowych Autor użył zbioru PTB-XL. W badaniach eksperymentalnych zweryfikowano podobieństwo strukturalne sygnałów oraz podobieństwo ich

cech. Następnie przetestowano skuteczność analizy sygnału EKG z użyciem istniejących architektur sieci neuronowych bazujących na technice *transfer learning*, a także z użyciem własnej sieci konwolucyjnej, pokazując wyższość autorskich rozwiązań. Wreszcie zweryfikowano przydatność technik filtracji sygnału EKG dla dalszej analizy.

[P4] Praca ta przedstawia badania nad możliwością wykrywania nieprawidłowości w przebiegu sygnału EKG i problemu migotania przedsionków z wykorzystaniem prostszej formy rejestracji aktywności elektrycznej serca w postaci EKG jednodoprowadzeniowego oraz metod głębokiego uczenia. Zaproponowano w niej architekturę sztucznej sieci neuronowej trenowanej osobno na każdym z 12 kanałów sygnału EKG pozyskanego techniką 12-odprowadzeniową na podstawie danych z publicznych zbiorów danych, a następnie testowano możliwości detekcyjne na podstawie również publicznie dostępnych danych ze zbioru CinC-2017 pozyskanych przy pomocy mobilnego urządzenia AliveCor (1-kanałowego). W ten sposób przetestowano 12 niezależnych modeli i sprawdzono skuteczność treningową poszczególnych kanałów, dla późniejszego wykrywania schorzeń serca przy użyciu urządzeń EKG 1-odprowadzeniowych. W pracy tej wprowadzono także dodatkowe kroki przetwarzania danych w postaci ponownego próbkowania sygnału, normalizacji, wykrywania załamków R, segmentacji i dopasowania okna analizy, wreszcie głosowania z wykorzystaniem zwykłej większości głosów i średniego poziomu pewności.

[P5] W pracy tej przedstawiono ulepszoną metodę augmentacji danych EKG opartą na detekcji pików R, segmentacji sygnału i reorganizacji segmentów, eliminując wady poprzednio opracowanej metody, przedstawionej w pracy P3. Weryfikacji skuteczności dokonano w procesie wykrywania migotania przedsionków (AF) poprzez klasyfikację z wykorzystaniem opracowanej wcześniej architektury konwolucyjnej sieci neuronowej, posługując się trzema publicznie dostępnymi zbiorami danych osiągając zadowalające wyniki.

Zaproponowanie odpowiednich sposobów reprezentacji danych i ich wstępnego przygotowania, technik augmentacji i filtrowania, a także opracowanie specyficznych architektur konwolucyjnych sieci neuronowych wraz z elementami segmentacji i głosowania uważam za istotne osiągnięcie Autora i zaliczam do oryginalnych wyników przedstawionych w rozprawie. Wyniki przeprowadzonych prac badawczych zostały opublikowane w 5 artykułach bądź w liczących się w dziedzinie informatyki czasopismach (m.in. *Computers in Biology and Medicine*, 100 pkt. MNiSW, *Biomedical Signal Processing and Control*, 140 pkt. MNiSW), bądź w materiałach konferencyjnych. Świadczy to w mojej opinii o istotności podjętego problemu w rozwoju informatyki i inżynierii biomedycznej.

5. Czy Autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawiania uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?

Realizując pracę Pan Muhammad Farhan Safdar wykazał dobre opanowanie umiejętności przedstawiania uzyskanych przez siebie wyników. Same idee zostały zaprezentowane w sposób dość jasny, sformalizowany i poparty przykładami, i co niezwykle istotne, poprzedzone szeroką analizą rozwiązań dotychczas zaprezentowanych na światowym forum naukowym. Oceny skuteczności rozwiązania

dokonano w oparciu o publicznie dostępne zbiory danych EKG. Wyniki oceny skuteczności opracowanych rozwiązań danej klasy zostały przeanalizowane i skomentowane w przedstawionych artykułach P1-P5 przedłożonej rozprawy pokazując, że poszczególne rozwiązania i modyfikacje dotychczasowych metod umożliwiają poprawę jakości i wydajności osiąganych wyników w porównaniu z wybranymi i dostępnymi metodami. Od strony redakcyjnej zarówno autoreferat, jak i prace P1-P5 są w większości napisane w dobrym stylu i czyta się je z łatwością, chociaż znalazłem w samym autoreferacie również kilka zdań, w których należałoby poprawić stylistykę wypowiedzi i gramatykę języka angielskiego.

6. Słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Przedstawione prace są bardzo ciekawe i dotyczą istotnych problemów budowania i działania algorytmów analizy sygnałów EKG wykorzystujących sztuczne sieci neuronowe, a także odpowiedniego przygotowania danych. Uzupełnia je autoreferat w języku angielskim, który zawiera najważniejsze konkluzje wypływające z przeprowadzonych prac badawczych. Nie znalazłem w tych dokumentach istotnych uchybień. Uwaga dotycząca poprawy stylistyki zdań w autoreferacie nie ma charakteru znacząco krytycznego i nie umniejsza znaczeniu osiągnięć Autora rozprawy. Mam natomiast kilka uwag i pytań, na które odpowiedź chętnie bym poznał:

Q1. W pracy P3 Autor mówi o minimalizacji zużycia pamięci w procesie przetwarzania danych, tymczasem ani w autoreferacie, ani w samej pracy P3 nie przedstawiono analizy złożoności tego algorytmu.

Q2. W pracy P2 Autor porównuje swoje rozwiązanie z pokrewnymi pracami opierając się na znanych miarach wydajności, jednakże powstaje pytanie, czy przytoczone prace pokrewne dotyczą tych samych obszarów analizy sygnałów EKG? tych samych procesów klasyfikacji? Podobnie ma się sprawa z Rys. 7 pracy P1.

Q3. W pracy P2 na Rys. 5 przedstawiono zużycie pamięci – jakiego procesu ono dotyczyło? trenowania sieci? W jaki sposób zmierzono zużycie pamięci?

Q4. Autor publikował swoje osiągnięcia w różnych czasopismach, dlaczego zatem przeprowadzony w pracy P1 przegląd literatury dotyczy tylko bazy Elsevier (pomijając m.in. takie bazy jak IEEE Xplore, SpringerLink i MDPI)?

U1. W autoreferacie niektóre wzory zostają podane bez jakiegokolwiek wprowadzenia (np. 2.9, 2.15, 2.16). Nie wiadomo jak je interpretować i w jakim celu zostały przytoczone.

U2. W autoreferacie, kiedy Autor opisuje historię uczenia maszynowego, nie wspomniano w ogóle postaci Johna Josepha Hopfielda, amerykańskiego fizyka, laureata Nagrody Nobla w 2024 roku za podstawowe odkrycia i wynalazki umożliwiające uczenie maszynowe z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Uważam, że przedłożona rozprawa doktorska Pana Muhammad Farhan Safdar wpisuje się w bieżące problemy informatyki i inżynierii biomedycznej. Opracowanie rozwiązań z dziedziny uczenia maszynowego

w analizie sygnałów EKG pozwoliło Autorowi na osiągnięcie dobrych wyników jakościowych przy zachowaniu satysfakcjonującej efektywności i wydajności czasowej w stosunku do istniejących rozwiązań opublikowanych w światowej literaturze, co przekłada się bezpośrednio na tworzenie lepszych rozwiązań w tym obszarze. W ten sposób zaproponowane rozwiązania rozszerzają spektrum istniejących metod stosowanych w analizie danych EKG z wykorzystaniem popularnych obecnie sztucznych sieci neuronowych. Potwierdzają to publikacje, których Pan Muhammad Farhan Safdar jest autorem, opublikowane przez wiodące wydawnictwa, takie jak *Elsevier* czy *IEEE*.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

a/ nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy

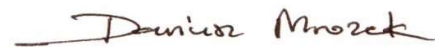
b/ wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania

c/ spełniająca wymagania

d/ spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem

e/ wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

Reasumując, bardzo dobre wyniki osiągnięte przez Pana Muhammad Farhan Safdar w trakcie realizowanych przez niego badań pozwalają potwierdzić, iż główne cele rozprawy przedstawione w rozdziale 1 i 2 autoreferatu. Wyniki badań pokazują, że techniki oraz metody zaproponowane przez Pana Muhammad Farhan Safdar mogą przyczynić się do znaczącej poprawy jakości procesów analizy danych EKG. Wartość tych metod została dostrzeżona przez środowisko naukowe, co potwierdzają opublikowane prace, wchodzące w skład przedstawionego cyklu głównego. Uważam zatem, że **przedstawiona rozprawa spełnia wymagania** stawiane rozprawom doktorskim określone w obowiązujących przepisach. Wnoszę zatem o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.



prof. dr hab. inż. Dariusz Mrozek
Katedra Informatyki Stosowanej
Politechnika Śląska w Gliwicach