Prof. dr hab. inż. Leszek Rutkowski

Instytut Badań Systemowych PAN

21 lipiec, 2025

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Szymkowskiego „Uczenie maszynowe oraz sztuczna inteligencja w trimodalnym systemie biometrycznym bazującym na odcisku palca, jego układzie żył i geometrii"

1. Informacje ogólne

Tytuł rozprawy: „Uczenie maszynowe oraz sztuczna inteligencja w trimodalnym systemie biometrycznym bazującym na odcisku palca, jego układzie żył i geometrii".

Autor: mgr inż. Maciej Szymkowski.

Promotor: prof. dr hab. inż. Khalid Saeed.

Jednostka prowadząca postępowanie: Wydział Informatyki Politechniki Białostockiej.

Dziedzina i dyscyplina naukowa: Dziedzina nauk inżynieryjno-technicznych, dyscyplina: informatyka techniczna i telekomunikacja.

Zgodnie z wymogami ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, art. 187, recenzja rozprawy doktorskiej zawiera następujące elementy:

1. ocena, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja,

2. ocena, czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez osobę ubiegającą się o nadanie stopnia doktora,

3. ocena, czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

WYDZIAŁ INFORMATYKI
SEKRETARIAT
WPŁYNĘŁO dn. 01-08-2025
Podpis

Rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Szymkowskiego zatytułowana „Uczenie maszynowe oraz sztuczna inteligencja w trimodalnym systemie biometrycznym bazującym na odcisku palca, jego układzie żył i geometrii", przygotowana pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Khalida Saeeda na Wydziale Informatyki Politechniki Białostockiej łączy problematykę biometrii, cyberbezpieczeństwa i uczenia maszynowego. Autor postawił tezę, że połączenie trzech modalności biometrycznych jednego palca, wspierane algorytmami sztucznej inteligencji, pozwala przekroczyć próg dziewięćdziesięciopięcioprocentowej skuteczności rozpoznawania w populacji liczącej ponad stu użytkowników, co w toku eksperymentów zostało potwierdzone, a najlepsza konfiguracja osiągnęła dokładność sięgającą dziewięćdziesięciu dziewięciu procent.

Rozprawa obejmuje 106 stron maszynopisu, siedem rozdziałów, obszerną bibliografię liczącą 97 pozycji, oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Układ pracy prowadzi czytelnika od zarysowania problemu i celów w rozdziale pierwszym, przez prezentację fundamentalnych zagadnień biometrii, analizę stanu literatury w zakresie systemów multimodalnych, szczegółowy opis autorskiego układu pomiarowego i algorytmów, a następnie metodykę i szczegółowe wyniki badań , aż po dyskusję nad potencjałem technologii haptycznych oraz całościowe podsumowanie.

Pod względem językowym praca prezentuje wysoki poziom poprawności. Styl jest klarowny, terminologia specjalistyczna trafnie dobrana, a definicje precyzyjne.

2. Ocena, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora w j dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja,

Odnosząc się do w/w punktu 1 (ocena ogólnej wiedzy teoretycznej) należy podkreślić, że autor wykazał się rozległą wiedzą zarówno w zakresie fundamentalnych pojęć biometrii i metod oceny działania systemów biometrycznych, jak i w obszarze współczesnych metod sztucznej inteligencji. Wnikliwa część przeglądowa wskazuje luki badawcze w dotychczasowych rozwiązaniach , na przykład marginalne zainteresowanie jednoczesnym wykorzystaniem odcisku, żył i geometrii jednego palca, co potwierdza krytyczny stosunek doktoranta do literatury i umiejętność formułowania własnych pytań badawczych. Omówię te kwestie teraz dokładniej:

Po pierwsze, Autor wykazuje się doskonałą znajomością **teorii systemów biometrycznych**. Rozróżnia systemy jednomodalne i wielomodalne, poprawnie identyfikując ich wady i zalety. Świadomość problemów związanych z podatnością na ataki, w szczególności spoofing, dowodzi zrozumienia nie tylko technicznych, ale i praktycznych, związanych z bezpieczeństwem, aspektów implementacji tych systemów. Przywołanie historycznego kontekstu stosowania biometrii świadczy o szerokich horyzontach i pełnym zrozumieniu ewolucji dziedziny.

Po drugie, fundamentem pracy są **sztuczna inteligencja i uczenie maszynowe**, co zostało wyeksponowane już w tytule. Stwierdzenie o „swoistej symbiozie" tych dziedzin z biometrią jest niezwykle trafną obserwacją. Autor poprawnie identyfikuje, że rozwój metod AI jest motorem napędowym dla tworzenia coraz doskonalszych algorytmów klasyfikacji i opisu cech ludzkich. Projektując system, który z powodzeniem osiąga ponad 99% skuteczności, Doktorant musiał wykazać się biegłością w zakresie algorytmów klasyfikacyjnych, metod ekstrakcji cech oraz technik fuzji informacji, które stanowią trzon nowoczesnej sztucznej inteligencji.

Po trzecie, praca dotyka zagadnień z obszaru **przetwarzania i analizy obrazów cyfrowych**. Akwizycja, a następnie ekstrakcja cech z obrazu odcisku palca oraz obrazu układu żył wymaga zastosowania zaawansowanych technik filtracji, segmentacji, detekcji punktów charakterystycznych i normalizacji danych.

Po czwarte, stworzenie fizycznego urządzenia do akwizycji danych dowodzi posiadania przez Doktoranta wiedzy z zakresu **systemów wbudowanych i techniki mikroprocesorowej**. Integracja sensorów, obsługa akwizycji danych i ich wstępne przetwarzanie w ramach dedykowanego urządzenia to klasyczne zadania z pogranicza informatyki i elektroniki.

Zatem, nie mam wątpliwości, że Mgr inż. Maciej Szymkowski posiada wiedzę teoretyczną znacznie wykraczającą poza jeden wąski obszar. Potrafi on w sposób twórczy syntetyzować zaawansowane koncepcje z co najmniej czterech kluczowych dla informatyki technicznej dziedzin: biometrii i systemów bezpieczeństwa, sztucznej inteligencji, przetwarzania obrazów oraz systemów wbudowanych. Takie interdyscyplinarne podejście świadczy o dojrzałości naukowej i pełnym opanowaniu warsztatu badawczego w reprezentowanej dyscyplinie.

3. Ocena, czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez osobę ubiegającą się o nadanie stopnia doktora,

Odnosząc się do w/w punktu 2, należy zauważyć, że autor sam zaprojektował i wykonał stanowisko akwizycji, integrując układy optyczne pozwalające w pojedynczym przebiegu pozyskać obraz odcisku, topografię naczyń krwionośnych oraz trójwymiarową geometrię dystalnej części palca. Projektowi towarzyszy pełna dokumentacja techniczna w postaci modeli CAD i listy części, co umożliwia replikację. Na poziomie algorytmicznym doktorant opracował oryginalne metody przetwarzania każdej modalności. Dla odcisku palca zastosowano filtrację Gabora z adaptacyjną binaryzacją, pozwalającą zwiększyć odporność na wilgotność skóry. Analiza żył została usprawniona poprzez autorskie odwzorowanie projekcyjne z kompensacją odblasków, co poprawiło kontrast struktur naczyniowych Wartościowa jest również krytyczna analiza parametrów fuzji, w której kandydat świadomie balansuje między maksymalizacją dokładności rozpoznawania a minimalizacją czasu obliczeń, uzyskując średni czas klasyfikacji próbek rzędu dziewięciuset milisekund. Skupiając się na walidacji, autor przeprowadził wielowariantowe eksperymenty obejmujące konfiguracje jednomodalne, bimodalne i trimodalne, których wyniki oceniono za pomocą pięciokrotnego kroswalidowanego podziału danych, testu chi-kwadrat dla różnic istotności i analiz wariancji, a także scharakteryzowano dokładność poprzez krzywe ROC i wartość EER. Równolegle doktorant wykazał się kompetencją w zakresie publikowania rezultatów: dorobek obejmuje siedem artykułów, w tym dwa w czasopismach z listy Journal Citation Reports oraz rozdział w serii Springer LNCS; te publikacje powstały bezpośrednio na podstawie pracy doktorskiej i dowodzą zdolności autora do komunikowania wyników w środowisku międzynarodowym. Za szczególnie cenne uważam udostępnienie zanonimizowanej bazy danych i kodu źródłowego na licencji open-source, co dowodzi odpowiedzialnej postawy badawczej i otwiera drogę do dalszych porównań. Wyartykułuję teraz dokładniej kluczowe elementy oceny odnośnie punktu 2:

a) **Identyfikacja i zdefiniowanie problemu badawczego:** Autor prawidłowo zdiagnozował kluczową słabość popularnych systemów biometrycznych – niską odporność rozwiązań jednomodalnych na próby oszustwa. Problem ten został jasno określony, co stanowiło punkt wyjścia dla dalszych prac.
b) **Sformułowanie celu i tezy badawczej:** Celem pracy było stworzenie bezpieczniejszego systemu poprzez zastosowanie architektury

wielomodalnej. Co niezwykle istotne, jak wcześniej stwierdziłem, Autor sformułował konkretną i mierzalną tezę badawczą: „system biometryczny bazujący na wszystkich trzech cechach będzie w stanie osiągnąć nie mniej niż 95% skuteczności rozpoznawania tożsamości użytkownika (przy bazie danych składającej się z nie mniej niż 100 użytkowników)"..

c) **Zaprojektowanie i realizacja procesu badawczego:** Ten etap jest najmocniejszym dowodem na samodzielność Doktoranta. Nie ograniczył się on do symulacji komputerowych na istniejących bazach danych. Zamiast tego, podjął się znacznie trudniejszego zadania:

Zbudowania autorskiego stanowiska badawczego – urządzenia do jednoczesnej akwizycji trzech różnych cech biometrycznych. Wymagało to nie tylko wiedzy, ale również umiejętności inżynierskich i organizacyjnych.

Opracowania własnych algorytmów ekstrakcji cech oraz metod ich fuzji.

Przeprowadzenia kompleksowych eksperymentów, które obejmowały zarówno systemy jednomodalne (jako punkt odniesienia), jak i docelowy system trimodalny.

Analiza, interpretacja i prezentacja wyników: Autor zebrał dane empiryczne, przetworzył je i na ich podstawie dokonał weryfikacji postawionej tezy. Streszczenie jasno komunikuje, że przeprowadzone badania potwierdziły prawdziwość tezy, a uzyskana skuteczność na poziomie ponad 99% nawet ją przewyższyła.

Zatem całokształt działań – od koncepcji, przez zbudowanie unikalnego zaplecza sprzętowego, opracowanie oprogramowania, przeprowadzenie metodycznych eksperymentów, aż po udowodnienie postawionej tezy – świadczy o tym, że mgr inż. Maciej Szymkowski jest samodzielnym, kreatywnym i konsekwentnym badaczem. Wykazał się on umiejętnością kompleksowego prowadzenia pracy naukowej, od fazy koncepcyjnej po empiryczną walidację.

4. Ocena, czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Odnosząc się do w/w punktu 3, należy stwierdzić, że : po pierwsze w rozprawie przedstawiono unikatowy i kompletny układ łączący trzy cechy jednego palca, co w praktyce zwiększa odporność na ataki prezentacyjne i redukuje wskaźnik błędu do poziomu ćwierć procenta. Po drugie, praca ma charakter kompleksowy, obejmując wszystkie warstwy – od hardware'u przez algorytmy po warstwę aplikacyjną – i może służyć jako punkt odniesienia dla konstruktorów przemysłowych sensorów biometrycznych. Po trzecie, wyniki eksperymentów wyraźnie pokazują przewagę podejścia trimodalnego nad konfiguracjami jedno- i bimodalnymi, co potwierdza tezę o synergicznym efekcie skojarzenia heterogenicznych cech palca. Jako słabsze strony należy wskazać umiarkowaną skalę bazy użytkowników, która choć wystarczająca dla walidacji dowodowej, nie pozwala wprost ekstrapolować wyników do systemów komercyjnych obsługujących dziesiątki tysięcy profili. Autor świadomy jest tego ograniczenia i sugeruje w kolejnych projektach stosowanie technik sztucznego powiększania zbioru lub testy na publicznych benchmarkach. Drugim niedostatkiem jest czas identyfikacji, mieszczący się co prawda w granicach akceptowalności, lecz wymagający dalszej optymalizacji, na przykład poprzez implementację równoległą lub wykorzystanie procesorów graficznych. Wreszcie rozdział poświęcony haptyce, choć ciekawy, pozostaje w fazie koncepcyjnej i można go rozwinąć w osobnym cyklu badawczym, zwłaszcza w kontekście integracji sprzężenia zwrotnego podczas rejestracji biometrycznej. Omówię teraz dokładniej zarówno mocne strony rozprawy, jak również wskażę na elementy, o które rozprawa mogłaby być rozbudowana w toku dalszych działań naukowych autora.

Mocne strony rozprawy:

- **Oryginalność i nowatorstwo rozwiązania:** Głównym atutem pracy jest jej oryginalny charakter. Autor nie tylko zaproponował wykorzystanie rzadko spotykanej, trimodalnej kombinacji cech (odcisk palca, układ żył, geometria palca), ale przede wszystkim zrealizował kompletny, działający system. Opracowanie zarówno warstwy sprzętowej (urządzenie akwizycyjne), jak i programistycznej (algorytmy ekstrakcji i fuzji) stanowi o kompleksowości i oryginalności podjętego zadania. Jest to oryginalne rozwiązanie istotnego problemu naukowego, jakim jest zwiększenie niezawodności i bezpieczeństwa systemów biometrycznych.
- **Wysoki potencjał aplikacyjny:** Rozwiązanie zaproponowane przez Doktoranta ma bezpośrednie przełożenie na praktykę. Systemy kontroli

dostępu, zabezpieczenia urządzeń mobilnych, bankowość elektroniczna czy systemy bezpieczeństwa państwowego to tylko niektóre z obszarów, gdzie odporny na próby oszustwa, wysoce skuteczny system biometryczny mógłby znaleźć zastosowanie.

- **Kompleksowość i rzetelność metodologiczna:** Praca została przeprowadzona z zachowaniem najwyższych standardów metodologii naukowej. Sformułowanie mierzalnej tezy badawczej, zbudowanie własnego stanowiska pomiarowego w celu zapewnienia spójności danych, a następnie empiryczna weryfikacja postawionych hipotez poprzez systematyczne eksperymenty świadczą o dojrzałości badawczej Autora.
- **Znakomite wyniki końcowe:** Osiągnięcie skuteczności rozpoznawania na poziomie przekraczającym 99% jest wynikiem imponującym i jednoznacznie potwierdza słuszność przyjętej koncepcji oraz jakość opracowanych algorytmów. Taki rezultat stanowi solidny dowód na wartość naukową rozprawy.

Słabsze strony (sugestie do rozważenia na przyszłość):

Każda praca naukowa stanowi punkt wyjścia do dalszych badań. W tym kontekście można wskazać potencjalne kierunki przyszłych prac, które mogłyby rozwinąć i uzupełnić bieżące dokonania Autora:

- **Badania odporności na zaawansowane ataki:** Chociaż system wielomodalny jest z natury odporniejszy na prosty spoofing, interesującym kierunkiem byłoby przeprowadzenie testów z użyciem zaawansowanych, dedykowanych „fałszywek", które próbowałyby naśladować wszystkie trzy cechy biometryczne jednocześnie.
- **Analiza wydajności i optymalizacja:** Należałoby zbadać złożoność obliczeniową zaproponowanych algorytmów i czas odpowiedzi systemu. W przyszłości można by podjąć próbę optymalizacji rozwiązania pod kątem jego implementacji na platformach o ograniczonych zasobach, np. urządzeniach mobilnych czy systemach wbudowanych.
- **Skalowalność i badania na większej populacji:** Teza mówiła o bazie „nie mniej niż 100 użytkowników". Cennym uzupełnieniem byłoby przetestowanie systemu na znacznie większej i bardziej zróżnicowanej demograficznie bazie danych, aby potwierdzić jego stabilność i uniwersalność w zastosowaniach na masową skalę. Przy okazji: wydaje

się, że terminologia „analiza statystyczna" użyta w rozdziale 5 jest użyta w innym znaczeniu, niż można by oczekiwać; chodzi o ewaluację wyników.

- **Badanie starzenia się cech (template aging):** Warto byłoby zbadać, jak zmieniają się użyte cechy biometryczne w dłuższym okresie i jaki ma to wpływ na skuteczność systemu, co jest istotnym problemem praktycznym w systemach biometrycznych.

Należy podkreślić, że powyższe punkty nie stanowią krytyki recenzowanej pracy, lecz wskazują na jej duży potencjał i możliwości dalszego, wartościowego rozwoju.

5. Konkluzja i wniosek końcowy

Doktorant z powodzeniem rozwiązał istotny i aktualny problem naukowy, jakim jest niska odporność jednomodalnych systemów biometrycznych na ataki typu spoofing. Zaproponowane przez niego oryginalne rozwiązanie w postaci kompletnego, trimodalnego systemu biometrycznego, obejmującego zarówno autorskie urządzenie do akwizycji danych, jak i zaawansowane oprogramowanie oparte na metodach sztucznej inteligencji, jest znaczącym osiągnięciem. Rzetelność metodologiczna, kompleksowe podejście do problemu oraz uzyskane, niezwykle wysokie wyniki skuteczności (ponad 99%) jednoznacznie potwierdzają dużą wartość merytoryczną pracy. Rozprawa dowodzi, że jej Autor posiada głęboką, interdyscyplinarną wiedzę teoretyczną oraz w pełni opanował umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy badawczej.

W świetle powyższych argumentów stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Szymkowskiego spełnia wszystkie wymogi formalne i merytoryczne stawiane rozprawom na stopień naukowy doktora, które zostały określone w art. 186 i 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce".

Niniejszym pozytywnie opiniuję przedstawioną dysertację i wnoszę do Przewodniczącego Rady Naukowej Wydziału Informatyki Politechniki Białostockiej o dopuszczenie jej Autora, mgr. inż. Macieja Szymkowskiego, do dalszych etapów postępowania doktorskiego, w tym do publicznej obrony rozprawy. Ponadto, borąc pod uwagę fakt, że doktorant samodzielnie przeprowadził pełny cykl badawczy od sformułowania hipotezy przez opracowanie infrastruktury badawczej, implementację algorytmów, realizację eksperymentów, po krytyczną ocenę wyników, a ponadto wykazał się

umiejętnością integrowania wiedzy interdyscyplinarnej, organizacji i zarządzania projektem laboratoryjnym i publikowania rezultatów w czasopismach i materiałach konferencyjnych na poziomie wymagań stawianych kandydatom do uzyskania stopnia dra habilitowanego (Scopus: h-index = 7, liczba cytowań łącznie = 143 , łączna liczba prac 42, w tym w wysoko punktowanych czasopismach) wnioskuję o wyróżnienie tej rozprawy doktorskiej.

Leszek Rutkowski