



dr hab. inż. Rafał Doroz
Instytut Informatyki, Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych
Uniwersytet Śląski
ul. Będzińska 39
41-200 Sosnowiec
rafal.doroz@us.edu.pl

Sosnowiec, 10.10.2025

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”

przygotowanej pod kierunkiem naukowym promotora, prof. dr. hab. inż. Khalida Saeeda.

1. Tematyka rozprawy

Rozprawa doktorska koncentruje się na opracowaniu i zbadaniu trimodalnego systemu biometrycznego dedykowanego do rozpoznawania tożsamości człowieka na podstawie odcisku palca, układu żył w palcu oraz geometrii palca. Autor formułuje tezę, że połączenie tych trzech cech – zrealizowane w dwóch wariantach fuzji (na poziomie decyzji oraz na poziomie cech) pozwala uzyskać co najmniej 95% skuteczności rozpoznawania dla bazy ≥ 100 użytkowników. W pracy Autor opracował zarówno urządzenie do akwizycji trzech cech, jak i część implementacyjną zawierającą algorytmy ekstrakcji, modele klasyfikacji oraz mechanizmy fuzji. System został empirycznie zweryfikowany na autorskiej bazie danych oraz zestawiony z rozwiązaniami z literatury. W najlepszej konfiguracji trimodalnej uzyskano ponad 99% dokładności, potwierdzając tezę rozprawy.

2. Ocena treści rozprawy

Recenzowana rozprawa jest rozbudowana i składa się z siedmiu rozdziałów oraz Bibliografii. Struktura pracy jest przemyślana: od tła i motywacji, poprzez przegląd stanu wiedzy i aspektów prawnych, po opis stanowiska badawczego, algorytmów, analizę skuteczności systemu oraz rozdział poświęcony możliwościom zastosowania technologii haptycznych w biometrii.

Rozdział pierwszy osadza pracę w kontekście cyberbezpieczeństwa i Internetu Rzeczy, wskazując ograniczenia loginu/hasła oraz przewagę biometrii multimodalnej. Autor formułuje tezę i cele, definiuje założenia dla platformy wbudowanej oraz uzasadnia wybór trzech cech biometrycznych odnoszących się do palca. Proponuje dwie architektury fuzji w systemie: oddzielne moduły ze wspólnym modulem decyzyjnym oraz fuzję cech do postaci jednego wektora. Jako kryteria oceny Autor wskazuje skuteczność oraz czas odpowiedzi.

Rozdział drugi stanowi wprowadzenie do biometrii. Autor definiuje kluczowe pojęcia i nakreśla rys historyczny rozwoju tej dziedziny — począwszy od klasycznej daktyloskopii, poprzez rozpoznawanie twarzy i tęczówki, po współczesne rozwiązania oparte na uczeniu głębokim i fuzji modalności. Następnie opisuje klasyfikację cech: fizjologicznych, behawioralnych oraz hybrydowych, omawiając ich właściwości oraz ograniczenia. Osobna część poświęcona jest zagadnieniom spoofingu i atakom prezentacyjnym. Rozdział kończy przegląd ram prawnych i etycznych regulujących przetwarzanie danych biometrycznych.

Rozdział trzeci zawiera zwięzły przegląd współczesnych systemów multimodalnych oraz wykorzystywanych w nich biometryk — w szczególności odcisku palca, układu żył i geometrii palca. Autor omawia również kluczowe metody sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego stosowane do przetwarzania, ekstrakcji cech i klasyfikacji, wskazując ich mocne i słabe strony w kontekście biometrii. Na tym tle jasno identyfikuje lukę badawczą: niedostatecznie zbadane systemy trimodalne oraz strategie fuzji cech na różnych poziomach (cech, decyzji), co uzasadnia dalsze prace eksperymentalne przedstawione w kolejnych rozdziałach.

Rozdział czwarty stanowi istotny wkład autora w dziedzinie biometrii i uczenia maszynowego, opisując autorską, kompletną platformę badawczą: od stanowiska akwizycji trzech modalności (odcisk palca, układ żył, geometria palca) wraz z charakterystyką zastosowanych skanerów, po autorskie metody ich przetwarzania. Autor opisuje procedury ekstrakcji cech — m.in. detekcję i opis minucji w odciskach oraz obrazach żył, a także konstrukcję deskryptorów geometrii palca. Rozdział domyka implementacja dwóch wariantów fuzji: architektury z niezależnymi modułami rozpoznawania i wspólnym modułem decyzyjnym oraz fuzji na poziomie cech poprzez scalanie wektorów w jeden reprezentatywny opis, przygotowany pod trenowanie modeli ML na platformie wbudowanej.

Rozdział piąty stanowi jedną z kluczowych części rozprawy i przedstawia ewaluację modułów jednomodalnych, porównanie z konfiguracjami multimodalnymi oraz zestawienie skuteczności zastosowanych metod fuzji. Autor pokazuje, że fuzja trimodalna podnosi skuteczność do poziomu ponad 99%. Wartościowym elementem rozdziału są praktyczne wskazówki dotyczące przygotowania wektorów cech oraz normalizacji wyników.

W szóstym rozdziale przedstawiono technologie haptyczne w kontekście biometrii i ich integracji z potencjalnymi rozwiązaniami multimodalnymi. To inspirujący kierunek dalszych prac, otwierający możliwość rozszerzenia spektrum kanałów biometrycznych.

Rozdział siódmy podsumowuje osiągnięcia i proponuje kierunki dalszych prac. Przewidują one m.in. szeroką walidację na zróżnicowanych danych i sensorach oraz eksplorację nowoczesnych modeli wizyjnych dla poprawy jakości systemu.

Bibliografia jest przemyślana i szeroka — łączy klasyczne podstawy z aktualnymi kierunkami badań.

3. Ocena oryginalności rozprawy

Zasadniczym celem pracy było opracowanie i empiryczne potwierdzenie skuteczności trimodalnego systemu biometrycznego, bazującego na odcisku palca, obrazie układu żył oraz geometrii palca, charakteryzującego się wysoką jakością rozpoznawania przy ograniczonych zasobach obliczeniowych platformy Raspberry Pi 4. Cel ten został w pełni zrealizowany: najlepsze konfiguracje nie tylko przekroczyły zakładany próg 95%, lecz osiągnęły skuteczność przekraczającą 99%.

Na oryginalność rozprawy składają się w szczególności:

- Opracowanie modelu integracji trzech komplementarnych cech biometrycznych w dwóch wariantach fuzji — na poziomie decyzji oraz na poziomie cech — wraz z ich rzetelnym porównaniem.
- Opracowanie autorskiego stanowiska akwizycji wraz z własną bazą próbek biometrycznych.
- Praktyczna implementacja rozwiązania na platformie wbudowanej.

Proponowane rozwiązanie wydaje się mieć realny potencjał wdrożeniowy np. w obszarach kontroli dostępu i ochrony zasobów, a jego koncepcję można łatwo przenieść do bankowości, przemysłu czy opieki zdrowotnej.

4. Uwagi dyskusyjne i polemiczne

Nie kwestionując wartości wyników zawartych w rozprawie, chciałbym zgłosić kilka uwag krytycznych i dyskusyjnych.

1. Brak pomiarów czasu działania (akwizycja, ekstrakcja, fuzja, klasyfikacja) utrudnia ocenę użyteczności proponowanego rozwiązania w warunkach rzeczywistych. W rozdziałach 4 oraz 5 nie przedstawiono zestawień czasów składowych ani przepustowości całego procesu przetwarzania.

2. W części eksperymentalnej (rozdz. 5) Autor nie wykorzystał popularnych metryk jak np. FAR, FRR, EER lub krzywych ROC/DET. Bez nich ocena bezpieczeństwa i porównywalność z rozwiązaniami znanymi z literatury może być utrudniona, a otrzymane wyniki zbyt optymistyczne, zwłaszcza w scenariuszu „90 w bazie / 10 spoza bazy”, gdzie błędne akceptacje nieznanych są słabo widoczne w użytych przez Autorach miarach. Przydatne są więc w tym przypadku metryki otwartego rozpoznawania i analiza progów.
3. Rozdział 5 nosi tytuł „Analiza statystyczna systemu”, lecz prezentuje głównie wyniki eksperymentów bez formalnych analiz jak np. jawnych hipotez, doboru testów czy poziomów istotności. W obecnej formie jest to raczej „Wyniki eksperymentów i ewaluacja” niż analiza statystyczna.
4. Wyniki np. w Tabelach 5.1-5.6 podawane są jako średnie bez miar niepewności (np. odchyłeń standardowych, przedziałów ufności), przez co trudna jest ocena ich stabilności.
5. Próg $d = 25$ użyty w rozdz. 4.3.1.1 przy odrzucaniu minucji jest podany w pikselach, co bez odniesienia do rozdzielczości/ppi, utrudnia ich analizę, replikację i transfer na inne dane.
6. Określenie „dekoder” użyte dla modułu którego przeznaczenie wydaje się być bliższe funkcji enkodera/ekstraktora cech (s. 74) wydaje się być nieprecyzyjne terminologicznie.
7. Proszę doprecyzować użyty na s. 84 termin „wiarygodność systemów jednomodalnych”, który jest dość szeroki. Czy chodzi o miary skuteczności (np. accuracy), czy raczej o rzetelność/niezawodność systemu (stabilność, odporność na zakłócenia, powtarzalność wyników)?
8. Brak wykresów train/validation loss i informacji o strategii early stopping utrudnia ocenę doboru liczby epok i ryzyka przeuczenia w procesie treningu modeli i klasyfikatorów.

5. Charakterystyka działalności naukowej, w tym publikacyjnej, Doktoranta

Autor wykazuje bardzo wysoką aktywność publikacyjną (ponad 40 pozycji, m.in. w IEEE Access, Sensors, LNCS/SPRINGER, konferencje), w tym wiele prac ściśle powiązanych z tematyką rozprawy i w znacznej części jako pierwszy autor. Taki profil publikacyjny jednoznacznie potwierdza samodzielność badawczą, konsekwencję tematyczną i wysoką aktywność naukową.

6. Ocena strony formalnej rozprawy

Rozprawa została napisana poprawną polszczyzną, a Autor prowadzi rozważania w sposób uporządkowany, spójny i logiczny, wykazując się sprawnym posługiwaniem się terminologią informatyczną oraz biometryczną. W pracy można zauważyć pewne drobne niedociągnięcia, m. in. brak konsekwencji w użyciu polskich i angielskich nazw metryk „precyzja” oraz „recall”. Zauważalne są pewne niekonsekwencje w odwołaniach np. do równań, jednak są one na tyle nieliczne, że nie ma potrzeby ich przytaczania.

7. Konkluzja końcowa

Rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Szymkowskiego stanowi oryginalne dzieło naukowe, wnoszące istotny wkład w rozwój biometrii multimodalnej. Autor wykazał się bardzo dobrym przygotowaniem w zakresie biometrii, przetwarzania obrazu i uczenia maszynowego oraz zdolnością do przeprowadzenia kompletnego procesu badań – od konstrukcji stanowiska badawczego i akwizycji danych, przez opracowanie i implementację autorskich algorytmów, po rzetelną ich ocenę. Praca pokazuje praktyczną przewagę fuzji trimodalnej, prezentuje działający prototyp na platformie wbudowanej oraz wskazuje jasną ścieżkę jej dalszego rozwoju.



Uwagi krytyczne oraz komentarze są kierowane z myślą o stymulacji dalszej dyskusji naukowej i inspiracji do kolejnych badań, a uzyskane wyniki stanowią oryginalny wkład Autora w dyscyplinie *Informatyka techniczna i telekomunikacja*, zwłaszcza w obszarze biometrii oraz uczenia maszynowego.

Wobec powyższego stwierdzam, że rozprawa doktorska **spełnia wszystkie wymogi stawiane przez Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce wobec rozpraw doktorskich. Wnoszę o dopuszczenie dysertacji do dalszych etapów przewodu doktorskiego, w tym do jej publicznej obrony.**

Rafał Ilcu