

Dr hab. inż. Mariusz Kubanek, prof. PCz
Katedra Informatyki
Wydział Informatyki i Sztucznej Inteligencji
Politechnika Częstochowska
ul. Dąbrowskiego 73, Częstochowa

Częstochowa, 22.04.2026 r.

Recenzja

Przedmiotem niniejszej recenzji jest rozprawa doktorska Pana magistra inżyniera Kamila MALINOWSKIEGO zatytułowana „Dwumodalny biometryczny system do rozpoznawania użytkownika” napisana pod kierownictwem Pana prof. dr hab. inż. Khalida Saeeda na Wydziale Informatyki Politechniki Białostockiej w 2025 roku.

1. Przedmiot i problematyka rozprawy

Przedmiotem rozprawy jest zagadnienie budowy i weryfikacji dwumodalnego systemu biometrycznego do rozpoznawania użytkownika, łączącego biometrię fizjologiczną opartą na analizie tęczy oka z biometrią behawioralną opartą na dynamice ruchu powiek podczas mrugania. Wraz z rosnącymi wymaganiami bezpieczeństwa w systemach uwierzytelniania, jednoskładnikowe metody biometryczne okazują się niewystarczające wobec współczesnych zagrożeń, takich jak ataki prezentacyjne czy efekt starzenia się szablonów biometrycznych. Zagadnienie badane przez Autora rozprawy wpisuje się w aktualne potrzeby projektantów systemów identyfikacji tożsamości, gdzie kluczowe staje się łączenie cech trudnych do jednoczesnego sfałszowania.

Proponowane przez Autora podejście pozwala na wykorzystanie jednego urządzenia rejestrującego do pozyskania obu modalności biometrycznych, co stanowi istotną zaletę praktyczną w porównaniu z rozwiązaniami wymagającymi dedykowanego sprzętu dla każdej z cech. Zaproponowane mechanizmy dobrze wpisują się w nurt badań nad detekcją żywotności (ang. liveness detection), stanowiącą jeden z kluczowych kierunków rozwoju współczesnej biometrii.

Przytoczone powyżej okoliczności wskazują jednoznacznie na aktualny i ważny nurt badawczy, którym Autor zajął się w ramach recenzowanej pracy.

Jako cel pracy badawczej Autor przyjął stworzenie i przetestowanie systemu biometrycznego opartego na dwóch modalnościach — tęczy oka i ruchach powiek — który zapewni wysoką skuteczność identyfikacji i niezawodność działania przy użyciu jednego urządzenia rejestrującego.

Teza głosi, iż system biometryczny wykorzystujący dwie modalności: tęczy oka i ruchy powiek, zapewni wysoką skuteczność identyfikacji użytkowników. Do osiągnięcia postawionego celu konieczne było opracowanie autorskich algorytmów segmentacji tęczy oka, kodowania i porównywania jej wzorców, a także metody analizy dynamiki ruchu powiek, zintegrowanych następnie w spójny system dwumodalny.

W toku rozprawy Autor prawidłowo formułuje cel badawczy, precyzuje problem naukowy i konsekwentnie realizuje zaplanowane czynności badawcze, prowadzące do pozytywnej weryfikacji postawionej tezy.



2. Analiza treści rozprawy

Rozprawa liczy 5 rozdziałów merytorycznych i obejmuje 125 stron. Bibliografia liczy 131 pozycji. Rozprawa zawiera liczne rysunki wykresy i tabele oraz wykaz skrótów i oznaczeń. Pracę można podzielić na trzy główne części: część wprowadzającą w zagadnienia biometrii oka ludzkiego, część prezentującą autorskie metody segmentacji, kodowania i porównywania wzorców tęczówki oka, oraz część poświęconą analizie ruchu powiek jako cechy behawioralnej i integracji obu modalności w system dwumodalny. Najistotniejsza część rozprawy z punktu widzenia oryginalnego wkładu Doktoranta rozpoczyna się od podrozdziału 2.2.

W kolejnych częściach rozprawy poruszonymi obszarami są:

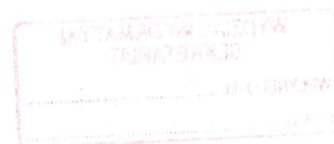
- wprowadzenie do biometrii oka ludzkiego, obejmujące charakterystykę narządu wzroku w kontekście biometrycznym, omówienie różnic między biometrią aktywną i pasywną, opis systemów multimodalnych oraz uzasadnienie podjętego tematu wraz z hipotezą, celem i zakresem pracy (Rozdział 1),
- szczegółowa analiza stanu wiedzy w zakresie metod lokalizacji i segmentacji tęczówki oka, obejmująca zarówno klasyczne algorytmy (operator Daugmana, transformata Hougha, aktywne kontury, algorytm Viola-Jonesa), jak i metody oparte na głębokim uczeniu maszynowym (CNN, UNet, Faster R-CNN, ResNet18, NSNet), a także techniki ekstrakcji cech (filtry Gabora, log-Gabora, transformata falkowa, transformata Haara, transformata Zaka-Gabora) oraz metody porównywania wzorców (Rozdział 2, podrozdział 2.1),
- autorska metoda segmentacji źreniczki z wykorzystaniem kanału H przestrzeni barw HSV, algorytm aproksymacji zewnętrznej granicy tęczówki z zastosowaniem harmonicznego przeszukiwania (HSA), metoda usuwania rzęs i cieni, a także hybrydowa metoda kodowania i porównywania wzorców tęczówki oparta na deskryptorach SIFT i syjamskiej sieci neuronowej wraz z wynikami eksperymentalnymi na bazach UBIRIS v1 i v2, MMU v1 i v2, IIT Delhi Iris oraz MILES (Rozdział 2, podrozdział 2.2),
- analiza mrugania powiekami jako dodatkowej cechy behawioralnej, obejmująca przegląd literatury dotyczącej metod detekcji ruchu powiek, autorską metodę identyfikacji użytkownika na podstawie dynamiki wartości EAR z zastosowaniem syjamskiej sieci neuronowej oraz wyniki eksperymentalne na bazie mEBAL i własnym zbiorze danych (Rozdział 3),
- omówienie koncepcji multimodalnej biometrii oka ludzkiego, prezentacja architektury dwumodalnego systemu biometrycznego łączącego tęczówkę oka z analizą ruchu powiek w oparciu o logiczną koniunkcję wyników obu modalności, bez konieczności stosowania złożonej fuzji cech (Rozdział 4),
- podsumowanie przeprowadzonych badań, wnioski dotyczące skuteczności zaproponowanych metod oraz wskazanie kierunków dalszych prac, w szczególności w zakresie rozszerzenia zbioru danych dla biometrii ruchu powiek i optymalizacji czasu wykonania algorytmów (Rozdział 5).

3. Najistotniejsze osiągnięcia naukowe

Rozprawa doktorska mgr inż. Kamila Malinowskiego zawiera nowe, oryginalne propozycje metod segmentacji, kodowania i rozpoznawania wzorców biometrycznych oka ludzkiego, a także autorską metodę identyfikacji użytkownika na podstawie dynamiki ruchu powiek, zintegrowane w spójny dwumodalny system biometryczny. Zaproponowane rozwiązania pozwalają na skuteczną i niezawodną weryfikację tożsamości użytkownika przy wykorzystaniu jednego urządzenia rejestrującego, bez konieczności stosowania złożonych algorytmów fuzji cech biometrycznych.

Jako najistotniejsze osiągnięcia naukowe należy wymienić:

- wykazanie przydatności kanału H (odcieni) przestrzeni barw HSV do efektywnej segmentacji źrenicy oka, z osiągniętą skutecznością 97,5% dla zaszumionych obrazów bazy UBIRIS v1,



- opracowanie i weryfikację eksperymentalną metody aproksymacji granic powiek z zastosowaniem algorytmu harmonicznego przeszukiwania (HSA),
- opracowanie hybrydowej metody kodowania i porównywania wzorców tęczy oka, opartej na ekstrakcji ścieżek wartości ekstremalnych odcieni szarości w połączeniu z deskryptorami Harris-Laplace/SIFT i syjamską siecią neuronową, osiągającej współczynnik EER na poziomie 0,17% i dokładność 98,7%,
- empiryczne potwierdzenie unikalności wzorca dynamiki ruchu powiek jako indywidualnej cechy behawioralnej każdego człowieka, z zastosowaniem syjamskiej sieci neuronowej do analizy przebiegu wartości EAR, osiągającej dokładność Top-1 na poziomie 98%,
- opracowanie architektury dwumodalnego systemu biometrycznego łączącego tęczy oka z analizą ruchu powiek w oparciu o logiczną koniunkcję wyników obu modalności, zapewniającego odporność na ataki prezentacyjne bez konieczności stosowania złożonej fuzji matematycznej.

4. Uwagi merytoryczne

Następujące uwagi mają charakter dyskusyjny i w żadnej mierze nie obniżają rangi zaprezentowanych w rozprawie dokonań naukowych.

- W tabeli 2.1 Autor przedstawia porównanie czasów konwersji przestrzeni barw RGB do HSV, LAB i YCbCr, przyjmując jako główne kryterium wyboru czas wykonania. Brakuje jednak szerszego, teoretycznego uzasadnienia, dlaczego spośród dostępnych przestrzeni barw to właśnie kanał H (odcień) przestrzeni HSV okazał się skuteczny do segmentacji źrenicy. Sam Autor przyznaje na stronie 48, że kanał H „wydaje się być wysoce niestabilny”, co rodzi pytanie: na jakiej podstawie podjęto decyzję o jego wyborze, skoro stabilność kanału jest warunkiem koniecznym dla niezawodnej segmentacji? Brakuje eksperymentu porównującego skuteczność poszczególnych kanałów jasności wszystkich trzech przestrzeni barw, który jednoznacznie uzasadniałby dokonany wybór.
- W tabeli 2.3 Autor zestawia skuteczność własnej metody segmentacji źrenicy z algorytmami Kheirolahy [43], Daugmana [34] i Cihana [35]. Porównanie to budzi poważne wątpliwości metodologiczne: poszczególne algorytmy były testowane na różnych bazach danych, w różnych warunkach oświetleniowych i przy różnych definicjach wskaźnika sukcesu. W szczególności metoda Kheirolahy testowana była wyłącznie na obrazach czystych, metoda Daugmana na obrazach zaszumionych, a algorytm Cihana na własnym zbiorze. Bezpośrednie zestawienie wartości procentowych bez wyrównania warunków porównawczych nie pozwala na wyciągnięcie wiarygodnych wniosków o rzeczywistej przewadze proponowanej metody.
- Na stronie 68 Autor podaje, że współczynnik FAR dla zaimplementowanego algorytmu rozpoznawania tęczy wynosi 5,8%, a EER osiąga poziom 3,3% — wyniki te dotyczą testu na 300 obrazach. Tymczasem w kolejnej, bardziej rozbudowanej serii eksperymentalnej (tabela 2.12) te same wskaźniki wynoszą odpowiednio FAR 1,30–3,40% i EER 0,13–0,34%. Rozpiętość ta jest na tyle znacząca, że wymaga szczegółowego wyjaśnienia. Czy zmieniła się metodologia? Czy zastosowano inne zestawy danych testowych? Czy przyjęto inne warunki prognozowania? Brak komentarza w tym zakresie może sugerować, że prezentowane wyniki nie są bezpośrednio porównywalne, co podważa spójność narracji eksperymentalnej w rozdziale drugim.
- Tabela 2.5 przedstawia parametry algorytmu harmonicznego przeszukiwania ($HMS=150$, $HMCR=0,7$, $PAR=0,3$, $BW=2$, $NI=200$). Autor podaje jedynie, że „na podstawie eksperymentów” ustalono te wartości, jednak brakuje jakichkolwiek szczegółów dotyczących procesu strojenia: ile wariantów parametrów przetestowano, jaka była miara oceny jakości rozwiązania (funkcja celu), jaki był zakres przeszukiwania przestrzeni parametrów? Podobne pytanie dotyczy

wartości progowej 0,9 przyjętej dla wskaźnika mapowania źrenicy P (strona 56) — skąd pochodzi ta wartość i dlaczego uznano ją za wystarczającą?

- Na stronie 56 Autor podaje, że wartości $R_{min}=50$ i $R_{max}=150$ dla zakresu poszukiwania promienia zewnętrznej granicy tęczówki „zostały dobrane eksperymentalnie po przeanalizowaniu wszystkich obrazów z wybranych baz danych”. Nie wiadomo jednak, w jaki sposób dobrano te wartości i czy są one wystarczające dla wszystkich możliwych rozmiarów tęczówek w obrazach rejestrowanych w różnych warunkach i przy różnych odległościach kamery od oka. Brakuje analizy wrażliwości wyników na zmianę tych parametrów.
- Na stronie 65 Autor opisuje metodę usuwania rzęs opartą na stałej 2,1 w wyrażeniu $\mu_1 - 2,1\delta$, stwierdzając, że „stała 2,1 została wyprowadzona poprzez analizę wszystkich obrazów z testowanych baz danych”. Jest to nieprecyzyjne — nie wyjaśniono, w jaki sposób konkretnie wyprowadzono tę wartość, jakiej metody optymalizacji użyto ani jak zachowuje się algorytm dla obrazów spoza testowanych baz. Autor sam przyznaje na stronie 69, że „algorytm usuwania rzęs i cieni powinien zostać zmodyfikowany” i że „zastosowana metoda jest obciążona znacznym błędem” — szkoda, że ta samokrytyczna ocena nie została rozwinięta o propozycję konkretnego kierunku poprawy.
- W rozdziale trzecim własny zbiór danych zebrany przez Autora liczy 200 próbek pobranych od zaledwie 10 osób przy użyciu kamery HD i komputera Raspberry Pi 4B. Jest to liczebność zdecydowanie niewystarczająca do statystycznie wiarygodnego potwierdzenia unikalności cechy behawioralnej, jaką jest wzorzec ruchu powiek. W literaturze poświęconej biometrii behawioralnej standardem są zbiory obejmujące co najmniej 50–100 osób, a badania pretendujące do uogólnionych wniosków — kilkaset. Ponadto brakuje opisu procedury zbierania danych własnych: czy uczestnicy mrugali spontanicznie, czy na polecenie? W jakich warunkach oświetleniowych rejestrowano próbki? Czy uwzględniono zmienność wewnątrzsobniczą wynikającą ze zmęczenia lub stanu emocjonalnego uczestników?
- W tabeli 3.4 wyniki metody Akhdana i innych [131] zostały oznaczone jako „—” bez jakiegokolwiek wyjaśnienia. Nie wiadomo, czy metoda ta nie mogła zostać odtworzona, czy wyniki były niedostępne, czy też eksperyment zakończył się niepowodzeniem. Tego rodzaju niewyjaśnione puste komórki w tabeli porównawczej są niewystarczające w pracy doktorskiej i powinny być opatrzone stosownym przypisem lub komentarzem w tekście.
- Rozdział czwarty, będący kluczowym dla tytułu i hipotezy całej pracy, jest paradoksalnie najkrótszy i ma charakter niemal wyłącznie koncepcyjny. Brakuje w nim jakiegokolwiek eksperymentu testującego działanie zintegrowanego systemu dwumodalnego jako całości. Autor prezentuje wyniki obu modalności osobno, natomiast nigdzie nie przeprowadza testu, w którym ta sama osoba byłaby jednocześnie weryfikowana przez tęczówkę i ruch powiek w jednej sesji. Ponadto deklarowana architektura logicznej koniunkcji (AND) powinna być poparta analizą wpływu tej decyzji na wypadkowe wskaźniki FAR i FRR systemu zintegrowanego — tego w pracy brakuje.
- Ostatnia uwaga jest pytaniem o praktyczne możliwości wdrożenia zaproponowanego systemu w warunkach rzeczywistych. Przy maksymalnym czasie segmentacji przekraczającym 2,4 sekundy (tabela 2.6) oraz braku zintegrowanego testu obu modalności nie jest jasne, jak system zachowywałby się w środowisku produkcyjnym, np. przy zmiennym oświetleniu, ruchu głowy użytkownika, noszeniu okularów korekcyjnych lub przy próbie uwierzytelnienia osoby z chorobami oczu wpływającymi na wzorzec tęczówki. Wydaje się, że Autor mógł spróbować utworzyć i przetestować taki system dwumodalny w wersji zintegrowanej w całość, korzystając chociażby z możliwości biblioteki „mediapipe”.

5. Uwagi i wątpliwości redakcyjne i edytorskie

Praca napisana jest językiem na ogół poprawnym, jednak w toku lektury napotkano szereg błędów redakcyjnych, stylistycznych i edytorskich, które miejscami utrudniają właściwą interpretację zamieszczonych opisów. Poniższe uwagi mają charakter porządkujący i nie wpływają na ocenę merytoryczną pracy.

- Na stronie 10 pojawia się forma gramatycznie niepoprawna: „w świetle podczerwony charakteryzuje się bardziej widocznymi różnicami w teksturze”. Podobnie na tej samej stronie błędnie zapisano: „do stworzenie zbioru obrazów CASIA-IrisV4”.
- Na stronie 11 Autor stosuje niepoprawną konstrukcję: „Siatkówka często nazywana jest warstwą światłoczuła oka”. Na tej samej stronie pojawia się niegramatyczne sformułowanie: „Widzenie kolorów w jasnym świetle zawdzięczane jest przez czopki” — poprawnie byłoby „Widzenie kolorów w jasnym świetle jest zasługą czopków” lub „za widzenie kolorów odpowiadają czopki”.
- Na stronie 15 widnieje błędna forma: „Atutem tej cechy odporność na zmienne warunki oświetleniowe” — brakuje orzeczenia.
- Na stronie 15 pojawia się niepoprawna składnia: „Istnieje wiele prac poruszających temat wykorzystania więcej niż jedną cechę biometryczną”. Podobnie na stronie 16 błędnie napisano „ataków na systemu biometryczne”, „osoba atakujące może”.
- Autor nagminnie używa słowa „ilość” (strony 8, 29, 31, 33, 43, itd.) w odniesieniu do rzeczy policzalnych, np. „ilość refleksów świetlnych”, „ilość parametrów”, „ilość klas”. Dla rzeczy policzalnych należy stosować słowo „liczba”, a nie „ilość”. Błąd ten powtarza się w całym tekście dość często.
- Na stronie 55 Autor używa formy osobowej liczby mnogiej: „wybraliśmy zdjęcia zawierające duże ilości szumu”. Na stronie 72 pojawia się „zastosowaliśmy opracowane w poprzednich artykułach schematy”, a na stronie 78 „zdecydowaliśmy o usunięciu obszarów tęczy”. Stosowanie form osobowych pierwszej osoby liczby mnogiej w pracy jednego autora budzi wątpliwości — czy praca powstała we współautorstwie? Jeśli nie, należy ujednolicić narrację do formy bezosobowej lub trzeciej osoby liczby pojedynczej.
- W kilku miejscach pracy Autor stosuje potoczne i nieformalne sformułowanie „w oparciu o” (strony 45, 82, 95) zamiast poprawniejszego stylistycznie „na podstawie” lub „z wykorzystaniem”. Dotyczy to m.in. zdań: „w oparciu o histogram”, „w oparciu o stopy błędów”, „w oparciu o stopę błędu”.
- Numeracja rysunków w rozdziale czwartym jest niespójna — podpisy rysunków oznaczone są jako 4.1–4.5, natomiast odwołania w treści rozdziału posługują się numeracją 3.1, 3.2 itd.
- Podpis tabeli 2.14 błędnie odnosi się do baz danych UBIRIS.v1, podczas gdy zawartość tabeli dotyczy wyników na bazie UBIRIS v2.

Oczywiście są to uwagi czysto redakcyjne i edytorskie, które nie wpływają na jakość merytoryczną pracy, jednak z recenzenckiego obowiązku należało je odnotować.

6. Ocena spełnienia wymogów formalnych

Rozprawa doktorska mgr inż. Kamila Malinowskiego spełnia wszystkie warunki określone w art. 187 przytoczonej ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. W zakresie ogólnej wiedzy teoretycznej — Doktorant wykazuje gruntowną znajomość zarówno klasycznych metod przetwarzania obrazów biometrycznych, jak i nowoczesnych technik głębokiego uczenia maszynowego, co potwierdza obszerny i rzetelny przegląd literatury obejmujący 131 pozycji z czołowych czasopism i konferencji międzynarodowych. W zakresie umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej — świadczą o tym samodzielnie

zaprojektowane i zaimplementowane algorytmy, kompleksowe badania eksperymentalne przeprowadzone na wielu bazach danych oraz publikacje w recenzowanych wydawnictwach międzynarodowych będące bezpośrednim efektem prowadzonych badań. W zakresie oryginalności rozwiązania problemu naukowego — praca wnosi udokumentowany wkład do literatury poprzez zastosowanie kanału H przestrzeni barw HSV do segmentacji źrenicy, użycie algorytmu harmonicznego przeszukiwania do aproksymacji granic powiek, opracowanie hybrydowej metody kodowania tęczy, a także empiryczne potwierdzenie unikalności wzorca dynamiki ruchu powiek jako cechy behawioralnej.

6. Wnioski końcowe

W świetle przedstawionej rozprawy oraz wyników badań Autora zawartych w publikacjach konferencyjnych i czasopismach chciałbym wesprzeć Autora w dalszym rozwijaniu metod biometrycznej identyfikacji użytkowników z wykorzystaniem cech oka ludzkiego. Wykonane dotychczas przez Autora badania, pomimo kilku uwag, zostały zaprezentowane w sposób wystarczający. Przedstawione wyniki pokazują, że łącząc biometrię fizjologiczną opartą na tęczy oka z biometrią behawioralną opartą na dynamice ruchu powiek, można w zaawansowany sposób budować systemy uwierzytelniania odporne na ataki prezentacyjne, a tym samym zapewnić wysoki poziom bezpieczeństwa przy jednoczesnym zachowaniu prostoty architektury systemu i możliwości jego wdrożenia na urządzeniach o ograniczonych zasobach obliczeniowych.

Uwagi merytoryczne i edytorskie zgłoszone w niniejszej recenzji nie mają znaczącego wpływu na jakość zaproponowanych rozwiązań algorytmicznych ani nie ujmują wartości rozprawie jako całości. Podsumowując, stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pana mgr inż. Kamila MALINOWSKIEGO, zatytułowana „Dwumodalny biometryczny system do rozpoznawania użytkownika”, spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. — Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce w zakresie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja. Wniosuję zatem do komisji o dopuszczenie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Kamila Malinowskiego do publicznej obrony.

