

dr hab. inż. Mariusz Oszust, prof. PRz
Katedra Informatyki i Automatyki
Wydział Elektrotechnik i Informatyki
Politechnika Rzeszowska

Rzeszów, 15.05.2026 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Kamila Malinowskiego
pt. „Dwumodalny biometryczny system do rozpoznawania użytkownika”**

Niniejsza recenzja została przygotowana w odpowiedzi na prośbę prof. dr. inż. Marka Krętowskiego, Przewodniczącego Rady Naukowej Wydziału Informatyki Politechniki Białostockiej, wyrażoną w piśmie WI.4130.3.2025 z dn. 9 marca 2026 r. zawierającym informacje o powołaniu mojej osoby przez Radę Naukową na recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora mgr. inż. Kamilowi Malinowskiemu. Postępowanie prowadzone jest w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Khalid Saeed.

Recenzowana rozprawa doktorska jest poświęcona zagadnieniom rozpoznawania użytkownika z jednoczesnym wykorzystaniem danych biometrycznych dwóch modalności opartych na wizyjnych wzorcach tęczy oka i ruchu powiek. Tak wybrane, komplementarne modalności mogą być stosowane wykorzystując to samo urządzenie rejestrujące systemu autentykacji w celu zwiększenia bezpieczeństwa rozwiązania. Opracowane lub dobrane i przystosowane przez Doktoranta elementy toru przetwarzania informacji, składające się na dwumodalny system autentykacji, są w kolejnych rozdziałach pracy porównywane z analogicznymi metodami z literatury na reprezentatywnych bazach wzorców. Rozprawa doktorska stanowi również pewnego rodzaju przewodnik wprowadzający do tematyki biometrii związanej z obserwacją oka za pomocą kamer podczas przedstawiania krok po kroku proponowanych przez Doktoranta rozwiązań cząstkowych.

Tematykę rozprawy uważam za aktualną istotną z punktu widzenia rozwoju dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Rozprawa obejmuje 125 stron i składa się z wykazu skrótów i oznaczeń, wstępu, pięciu rozdziałów, spisu literatury zawierającego 131 pozycji, spisu tabel i rysunków oraz streszczeń w języku polskim i angielskim.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do zagadnień biometrii, podkreślając znaczenie weryfikacji osób na podstawie cech fizjologicznych lub behawioralnych w systemach uwierzytelniania. Techniki te cieszą się dużą popularnością ze względu na brak konieczności stosowania dodatkowych urządzeń zewnętrznych czy zapamiętywania haseł. Ponieważ od systemów biometrycznych oczekuje się zarówno prostoty użytkowania, jak i wysokiej skuteczności, Doktorant wskazuje na możliwość połączenia dwóch metod opartych na cechach oka. Proponuje on wieloskładnikowe podejście do uwierzytelniania, które nie wymaga od użytkownika wykonywania dodatkowych czynności, a wykorzystuje rozpoznawanie tęczy oka oraz analizę mrugania powieką. W podrozdziale 1.1 Doktorant przedstawił funkcjonowanie ludzkiego narządu wzroku, ze szczególnym uwzględnieniem informacji na temat narządów służących do rejestracji tęczy oka i siatkówki oka. Następnie, w rozdziale 1.2, dokonał rozróżnienia pomiędzy biometrią aktywną i pasywną. Wskazał przy tym na zasadność stosowania obserwacji obrazów tęczy oka oraz ciągłej analizy unikalnego sposobu mrugania powiekami. W rozdziale 1.3 Doktorant sformułował cel pracy, definiując go jako „sprawdzenie, czy możliwe jest wykorzystanie tęczy oka oraz ruchu powiek podczas mrugania do jednoznacznej identyfikacji

człowieka bez zastosowania skomplikowanych algorytmów fuzji cech biometrycznych". Warto zauważyć, że połączenie obu tych modalności nie było dotychczas opisywane w literaturze. Uzasadnienie podjęcia rozważanego tematu znajduje się w rozdziale 1.4 i opiera się na wyszczególnieniu typów ataków na systemy biometryczne oparte na jednej modalności - zwłaszcza tych, które polegają na odtwarzaniu próbki przed urządzeniem rejestrującym (np. za pomocą filmu lub zdjęcia). W rozdziale 1.5 Doktorant zdefiniował problem badawczy, cele badań oraz przedstawił następującą hipotezę: „System biometryczny wykorzystujący dwie modalności: tęczę oka i ruchy powiek, zapewni wysoką skuteczność identyfikacji użytkowników”. Tak sformułowana hipoteza wskazuje na potrzebę zapewnienia jak najwyższej skuteczności identyfikacji przy jednoczesnym uwzględnieniu niepewności związanej z rezultatami konstruowanego systemu. Rozdział 1.6 zawiera ogólny opis układu pracy oraz zawartości poszczególnych części.

W rozdziale 2.1 Doktorant analizuje stan wiedzy na temat metod rozpoznawania człowieka na podstawie tęczy oka, opierając się na pracach [33]–[73]. Rozdział otwiera dyskusja nad sposobem działania oraz wadami popularnych metod segmentacji tęczy, uwzględniająca podejście Daugmana [33], zastosowanie aktywnych konturów [38, 40], kołową transformatę Hougha [46] oraz wykorzystanie sieci neuronowych [49, 54, 55]. W dalszej kolejności Autor omawia wstępne przetwarzanie obrazów za pomocą różnorodnych filtrów poprawiających ich jakość [58, 59], a następnie przechodzi do metod rozpoznawania wykorzystujących warianty sieci neuronowych [59, 62], maszyny wektorów nośnych (SVM) [63] oraz techniki wzbogacania danych [65]. Przedstawia również metody kodowania tęczy z wykorzystaniem filtrów Gabora [66], analizy falkowej [71], histogramów [73] oraz transformaty Haara [71]. W rozdziale 2.2 prezentuje własne podejście do ekstrakcji, kodowania i porównywania tęczy. Badania przeprowadzono na bazie UBIRIS.v1 [11], zawierającej 1877 zdjęć zebranych od 241 osób. Po analizie przestrzeni barw RGB, HSV, YCbCr oraz LAB, wybrano kanał H z przestrzeni HSV. Jego zastosowanie wymagało usunięcia zarysowań i refleksów świetlnych, co zrealizowano przy pomocy filtrów (m.in. Gaussa, medianowego, bilateralnego oraz dyfuzji anizotropowej). Doktorant porównał te rozwiązania i uzasadnił wybór filtru Gaussa jego niewielkim kosztem obliczeniowym. Proces segmentacji obejmuje progowanie obrazu oraz opis grup pikseli za pomocą cech okrągłości, wypukłości i współczynnika bezwładności. W końcowym etapie wykorzystano operatory morfologiczne do odnalezienia granicy źrenicy (całość procesu przedstawia Rysunek 2.35). Skuteczność wyznaczania granicy tęczy w zaproponowanym podejściu przekroczyła 97%. Do binaryzacji obrazu wykorzystano metodę Otsu, natomiast do określenia punktów zewnętrznej granicy tęczy użyto zmodyfikowanej transformaty Hougha, porównując ją pod kątem obliczeniowym z alternatywnymi podejściami (Tabela 2.4). Precyzyjne granice ustalono za pomocą algorytmu dopasowania okręgu [85], a krzywe granice powiek wyznaczono przy użyciu algorytmu ewolucyjnego (metoda harmonicznego przeszukiwania [88]). Ostatnim etapem segmentacji było usunięcie rzęs i cieni za pomocą algorytmu z pracy [90]. Efektywność metody badano przy użyciu wskaźników błędów obszaru pierwszego planu (RFAE), dokładności (ACC), złożoności czasowej oraz krzywej ROC na bazach UBIRIS.v1, MMU.v1 i MILES, uzyskując satysfakcjonujące rezultaty (Tabela 2.7). W dalszych etapach, po konwersji do przestrzeni HSV, wykorzystano kanał V do uwydatniania szczegółów algorytmem CLAHE. Zgodnie z metodą z pracy [94], wyodrębniono ścieżki intensywności punktów (Rysunek 2.51). Do uzyskania reprezentacji obrazów wykorzystano algorytm Harris-Laplace'a w celu wykrycia punktów kluczowych oraz deskryptor SIFT do ich opisu. W procesie porównywania deskryptorów zastosowano algorytm RANSAC do eliminacji błędnych dopasowań, a następnie metodę siłową z odległością euklidesową oraz sieci syjamskie [99]. Wyniki porównano z własnymi implementacjami algorytmów [94, 101, 102], raportując wysoką dokładność i niski współczynnik EER (Tabele 2.11–2.14).

W rozdziale trzecim Doktorant przedstawia mruganie powiekami jako dodatkową cechę behawioralną. Cecha ta może być niewystarczająca jako samodzielna metoda weryfikacji ze względu na możliwość odtworzenia sposobu mrugania, jednak założono, że w połączeniu z rozpoznawaniem tęczywki może stanowić skuteczny drugi poziom zabezpieczenia. Doktorant wskazał typowe ataki na systemy autentykacji [125, 126] oraz wykorzystał do badań bazę EBAL [128], zawierającą 3000 nagrań od 38 osób. Klasyfikacji dokonano za pomocą sieci syjamskiej oraz architektury VGG16. W przypadku sieci syjamskiej zbadano wpływ wartości marginesu oraz struktury wewnętrznej na uzyskiwaną dokładność. Wyniki zestawiono z metodami literaturowymi w oparciu o krzywe ROC, dokładność i wartość EER (Tabela 3.3). Dodatkowo Doktorant samodzielnie zebrał próbki od 10 osób, na których zweryfikował działanie istniejących metod.

Rozdział czwarty zawiera przegląd dostępnych rozwiązań w zakresie multimodalnej biometrii oka oraz rozważania nad ich uzupełnieniem o analizę mrugania. Doktorant scharakteryzował różne podejścia, uwzględniając zastosowane klasyfikatory (sieci syjamskie, SVM, sieci LSTM). Omówił również typowe problemy takich systemów, wynikające ze zmiennych warunków oświetleniowych czy zmian chorobowych narządu wzroku. Rozdział kończy wskazanie zalet dwumodalnego rozwiązania, takich jak wykorzystanie jednego urządzenia rejestrującego, szybkość działania oraz zwiększone bezpieczeństwo dzięki wymogowi pozytywnej identyfikacji w obu modułach.

Rozdział piąty stanowi podsumowanie zaproponowanych metod biometrycznych i ponownie podkreślenie korzyści płynących z ich integracji w ramach jednego systemu.

Doktorant mając na uwadze realizację celu badawczego uzyskał szereg nowych rezultatów. Do najważniejszych zaliczam:

- Wykonanie modyfikacji transformaty Hougha oraz jej zastosowanie do wyznaczenia zewnętrznej granicy tęczywki.
- Wykorzystanie algorytmu ewolucyjnego do odnajdywania krzywych granic powiek.
- Stworzenie własnych implementacji istniejących algorytmów w celu rzetelnego porównania ich z autorską metodą na wielu bazach danych oraz zebranie własnego zbioru danych testowych od 10 osób.
- Opracowanie nowego podejścia dwumodalnego - połączenia biometrii fizjologicznej (tęczywka oka) oraz behawioralnej (ruch powiek podczas mrugania) w ramach jednego systemu autentykacji.

Do zasadniczych słabości rozprawy należą liczne usterki redakcyjne, brak usystematyzowanej analizy istniejących metod oraz niedostateczne przedstawienie weryfikacji eksperymentalnej wybranych komponentów zaproponowanego rozwiązania. Rozprawa sprawia wrażenie pisania w pośpiechu, bez starannej korekty redakcyjnej, bez wyraźnych przejść pomiędzy rozwiązaniami literaturowymi a własnymi oraz licznymi przypadkami braku precyzji sformułowań.

Uwagi merytoryczne:

1. Na stronie nr 9 napisano w kontekście rozpoznawania wzorców tęczywek, że „współczynnik błędów rozpoznawania wzorca może osiągnąć poziom 150% [10] wraz z upływem lat”. W tym miejscu pracy czytelnik jeszcze nie zna sposobów oceny systemów biometrycznych i należy, choćby zgrubnie, wyjaśnić czym jest ten błąd. Czy podana wartość (150%) jest prawidłowa?
2. Ponieważ celem badań jest stworzenie i przetestowanie systemu biometrycznego opartego na dwóch modalnościach, który zapewni wysoką skuteczność identyfikacji i niezawodność działania, zasadne jest przedstawienie eksperymentów prezentujących niezawodność zaproponowanego rozwiązania. Które z eksperymentów zawartych w pracy dotyczą tego

zagadnienia? Wspomniano np., że „rozwiązanie jest niewrażliwe na niedoskonałości źrenicy”. Jakie warunki pracy propozycji rozwiązania brano pod uwagę? W jaki sposób w tych eksperymentach dane podzielono na podzbiory uczący i testowy? Czy znane są wyniki szczegółowe?

3. W tabeli 2.3 na stronie 56 porównano trzy podejścia z literatury z zaproponowaną metodą, która osiągnęła wartość wskaźnika sukcesu równą 97,5% w przypadku obrazów zaszumionych i 100% w przypadku obrazów bez szumu. Metodę uruchomiono na 1219 obrazach 241 osób z bazy UBIRIS v1. Jedną z metod, której wynik jest również raportowany w tabeli jest metoda z pracy [35], która na bazie obrazów należących do 12 osób (i 3904 obrazów [35]) osiągnęła 97% - zgodnie z informacją podaną na stronie 12 rozprawy: „Autorzy przetestowali proponowany algorytm na obrazach oka uzyskanych od 12 osób, osiągając skuteczność na poziomie 97%.” Być może jest to kwestia braku precyzji w opisie wyników umieszczonych w tej tabeli, ale czy możemy w sprawiedliwy sposób porównywać metody raportując ich wyniki uzyskane dla różnych baz zawierających odmienne obrazy?
4. Na stronie 57 napisano, że wartości R_{min} i R_{max} wykorzystane do odnalezienia promienia R okręgu zawierającego punkty znajdujące się na zewnętrznej granicy tęczówki „zostały dobrane eksperymentalnie po przeanalizowaniu wszystkich obrazów z wybranych baz danych”. A) Wyznaczono wartości 50 i 150, odpowiednio dla R_{min} i R_{max} . Jaki jest wpływ ich doboru na segmentację tęczówki (Tabele 2.7-2.8)? B) Ponieważ do ustalenia wartości R_{min} i R_{max} wykorzystano kompletne zbiory obrazów z baz UBIRIS v1, MILES oraz MMU.v1, czy nie doszło tutaj do wycieku danych pomiędzy podzbiórami uczącym i testowym? Czy dobór parametrów na podstawie wszystkich obrazów nie zniekształca wyników z Tabel 2.7–2.8?
5. Warto rozważyć uzupełnienie informacji o proponowanym dwumodalnym rozwiązaniu o schemat blokowy całego systemu (o stopniu szczegółowości odpowiadającym Rysunkowi 2.35). Wskazane byłoby graficzne wyróżnienie (np. kolorem) metod autorskich, zmodyfikowanych oraz implementowanych bezpośrednio z literatury.
6. Na stronie 78 zamieszczono informację o usuwaniu obszarów tęczówki przesłoniętych powiekami w celu „zwiększenia jakości wykrytych punktów kluczowych”. W jaki sposób obniżona jakość punktów kluczowych objawia się w takich przypadkach? Czy można to pokazać na rysunku lub w postaci wyników dla metody? Czy proces usuwania tych obszarów jest realizowany w pełni automatycznie również dla obrazów testowych?

Mniej istotne, wybrane usterki redakcyjne:

- Str. 7. Brak przecinków przed „ale” oraz „które”,
- Str. 10. Literówka: „w świetle podczerwony charakteryzuje”,
- Str. 11. Brak przecinka przed „na którym”,
- Str. 14. Brak kropki na końcu zdania,
- Str. 15. Brak przecinka przed „w której”, podwójna kropka na końcu zdania,
- Str. 16. Brak kropki na końcu wypunktowania, kolejne jego elementy powinny być oddzielone przecinkami -ta usterka powtarza się niemalże w całej pracy,
- Strona 20. Literówka: „obraz w sakli szarości”,
- Strona 26. Literówka: „granica tak wyznaczonego obszar nie zawsze”,
- Strona 30. Literówka: „najczęściej używa się korku wynoszącego”,
- Str. 41. Literówka: „T-Centerl Loss”,
- Str. 52-55. Kod programu pozbawiony komentarzy, niektóre wartości lub funkcje nie mają odzwierciedlenia w tekście,
- Str. 56. Literówka: „do skutecznego wyznaczenie wewnętrznej granicy”,

- Str. 57. Literówka: „do określenie punktów należących”, brak przecinka przed „ale”, błąd w zapisie „Hough’a”,
- Str. 67. Niejasne sformułowanie: „Intuicyjnie im wyższa wartość skuteczności segmentacji, oznacza większą skuteczność segmentacji”,
- Str. 77. Niejasne sformułowanie: „Do eliminacji punktów o błędnych cechach posłużono się algorytmem RANSAC”,
- Str. 77. Literówka: Rysunek 2.53 - „po zastosowanie RANSAC”,
- Str. 77. Niejasne sformułowanie: „Metoda gwarantuje uzyskanie rozwiązania bez żadnej gwarancji, że rozwiązanie jest optymalne”,
- Str. 78. Niejasne sformułowanie: „odporne są na zagracone obrazy”, literówka: „Zabieg ten pozwala na zwiększenie”,
- Str. 89. Literówka: „nie był w stanie poprawnie wyodrębnić odpowiednie punkty potrzebne”,
- Rozdział 3. Odwołania do rysunków w tekście zaczynają się od wartości 3.6 zamiast od 3.1,
- Str. 90. Literówka: „wystarczy analiza odpowiednio wyodrębnione punkty wraz”,
- Str. 98. Brak przecinka przed „który”,
- Str. 99. Literówka: „czy testowany algorytmy będą”,
- Tabela 3.4. Brak wartości dla metody z pracy [131],
- Str. 103. Wzór 3.1 znajduje się w rozdziale 4, zaś zgodnie z konwencją powinien zacząć się od cyfry 4,
- Rozdział 4. W tekście znajdują się odwołania do rysunków o numerach z poprzedniego rozdziału, np. 3.2 zamiast 4.2 na stronie 103,
- Strona 106. Brak przecinka przed „ponieważ”,
- Cały tekst. Brak przecinków i kropek na końcu wzorów lub wyrażeń z „gdzie”, którego także czasami brakuje,
- W wielu przypadkach zmienne we wzorach nie są wyjaśnione, np. lambdy we wzorze 2.21, lambda we wzorze 2.24 oraz wzorze 2.30.

Przedstawione uwagi, z wyłączeniem kwestii redakcyjnych, mają charakter polemiczny i nie podważają merytorycznej wartości pracy. Należy zaznaczyć, że wyznaczony cel został zrealizowany w całości, a uzyskane rezultaty stanowią pełne potwierdzenie słuszności postawionej przez Autora hipotezy badawczej. Rozprawa jest merytorycznie spójna i spełnia standardy stawiane pracom doktorskim, prezentując systematyczny przegląd wiedzy oraz zweryfikowane nowe metody badawcze. Praca potwierdza samodzielność naukową Doktoranta, jego rozległą wiedzę odnośnie omawianej tematyki oraz biegłość w posługiwaniu się warsztatem badawczym.

Biorąc pod uwagę powyższe oraz wymagania określone w art. 187 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1571 z późn. zm.), stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Kamila Malinowskiego zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a Kandydat posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W związku z powyższym pozytywnie opiniuję przedstawioną rozprawę doktorską, wnoszę o jej przyjęcie oraz dopuszczenie jej Autora, mgr. inż. Kamila Malinowskiego, do dalszych etapów postępowania, w tym do publicznej obrony rozprawy.

