

Dr hab. Ryszard Kozera, prof. SGGW

Warszawa, 20.05.2026 r.

Instytut Informatyki Technicznej

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

Ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

Tel: +48 22 5937279

E-mail: ryszard_kozera@sggw.edu.pl

RECENZJA rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Kamila Malinowskiego

z Wydziału Informatyki, Politechniki Białostockiej

zatytułowanej „*Dwumodalny biometryczny system do rozpoznawania użytkownika*”

Promotor:

Prof. dr hab. inż. Khalid Saeed

Wydział Informatyki

Politechnika Białostocka

Niniejszą recenzję przygotowałem na zlecenie zawarte w piśmie z dnia 09.03.2026 r., które otrzymałem od profesora Marka Krętowskiego Przewodniczącego Rady Naukowej Wydziału Informatyki Politechniki Białostockiej na podstawie decyzji posiedzenia Rady Naukowej Wydziału Informatyki Politechniki Białostockiej podjętej w dniu 04.03.2026 r.

I. Zawartość rozprawy

Rozprawa doktorska stanowi studium o charakterze teoretyczno-empirycznym mającym za zadanie stworzenie i przetestowanie systemu biometrycznego w oparciu o syntezę dwóch modalności, tj. *badanie tęczy oka* (biometria aktywna) oraz *badanie ruchu powiek* (biometria pasywna). Celem badań było zaproponowanie i przetestowanie systemu rozpoznającego tęczy oka oraz specyfikację i klasyfikację ruchu powiek oka do konstrukcji skutecznego bimodalnego systemu uwierzytelnienia. Postawiona **hipoteza badawcza** (Seksja 1.5 rozprawy doktorskiej) to: *system biometryczny wykorzystujący dwie modalności: tęczy oka i ruchy powiek zapewni wysoką skuteczność identyfikacji użytkowników.*

Rozdział 1 wprowadza podstawowe pojęcia budowy oka, w tym biometrii tęczy. Wyjaśniony jest w nim podział biometrii na *biometrię aktywną* (fizjologiczną) oraz *pasywną* (behawioralną). Przykładem tej pierwszej jest badanie tęczy oka. Natomiast przykładem tej drugiej jest badanie ruchu powiek oka. W dotychczasowej literaturze nie było podjętych zaawansowanych badań nad fuzją tego typu dwumodalnych systemów biometrycznych. W tym kontekście podjęcie tematyki doktoratu ma na celu uzupełnienie powyższej luki badawczej i stanowi konkretną próbę

odpowiedzi na postawioną powyżej hipotezę badawczą odnoszącą się do możliwości zbudowania dwumodalnego systemu biometrycznego (identyfikacja tęczówki i ruchu powiek) w celu uzyskania poprawy jakości procesu uwierzytelnienia.

Rozdział 2 w sekcji 2.1 omawia w pierwszej części podstawowe techniki identyfikacji tęczówki w oparciu o metody klasyczne oraz metody wykorzystujące sieci typu CNN (omówione jest zagadnienie lokalizacji tęczówki w tym wyznaczenie jej wewnętrznej i zewnętrznej brzozy). Klasyczne metody biometrii wymagające mniejszych zasobów obliczeniowych są jednak czułe na szum i zniekształcenia. Sztuczne sieci neuronowe muszą być też trenowane ponownie w przypadku pojawienia się nowej kategorii do klasyfikacji (podwyższona złożoność). W sekcji 2.1 podane są autorskie algorytmy mające na celu segmentację źrenicy bardziej odpornej na zniekształcenia obrazu oraz szumy (akwizycja obrazu, rozdzielczość, częściowe zasłonięcie przez powieki). Do analizy obrazu użyta jest reprezentacja przestrzeni barw HSV. Wewnętrzna granica tęczówki wyznaczona jest na bazie danych uzyskanych z kanału H, czyli z odcienia światła. Algorytm do segmentacji źrenicy oka opisany jest schematycznie na rys. 2.35. Jest on niewrażliwy na niedoskonałości źrenicy z porównywalnym wskaźnikiem sukcesu względem innych algorytmów – patrz tab. 2.3. Do określenia zewnętrznej granicy oka użyta jest zmodyfikowana transformata Hough'a (str. 57) dająca szybsze czasy obliczeń (tab. 2.4 str. 58). W następnym kroku (na bazie wykrytych punktów granicy wewnętrznej i zewnętrznej tęczówki) doktorant stosuje algorytm Chernova et al. [85] do analitycznego wyznaczenia dwóch okręgów modelujących wewnętrzną i zewnętrzną brzozy tęczówki (rys. 2.37). Wyznaczenie analitycznego wzoru brzozy powieki dolnej i górnej (algorytm harmonicznego przeszukiwania HSA [88] z rozszerzeniem z dopasowania koła na dopasowanie paraboli) opiera się na wyselekcjonowaniu najpierw kandydatów na brzozy (autorska procedura: Rys. 2.39) a następnie na wielokrotnych interpolacjach parabolicznych trójek punktów (kosztowny obliczeniowo) przybliżających granicę górnej (dolnej) powieki. Wybiera się tu tą parabolę, która maksymalizuje liczbę punktów kandydatów dopasowujących się do optymalnej paraboli (tj. spełniających równanie paraboli). W kolejnym kroku autor omawia ostatni etap segmentacji tęczówki tj. usunięcie rzęs i cieni. Tu algorytm [99] nie dał w praktyce dobrych wyników i ta część pracy doktorskiej wymaga, jak autor podkreślił dalszych badań. Do testów dokładności rozpoznawania tęczówki oka (po przeprowadzeniu segmentacji) doktorant zastosował Algorytm Daugmana [34]. Eksperymenty wykazały, iż detekcja granicy powiek dolnych i górnych przy użyciu HSA (w opcji parabolicznej) daje dobre rezultaty (tab. 2.6 i 2.7). Całość omawianego powyżej rozwiązania (w tym adaptacje istniejących algorytmów) stanowi autorskie podejście do segmentacji tęczówki (uzyskany współczynnik dokładności na poziomie 90%). W końcowej części tego rozdziału raportowane są wyniki przeprowadzonych eksperymentów do klasyfikacji tęczówki w oparciu o tzw. sieci syjamskie w połączeniu z deskryptorami cech SIFT (autorska metoda: kodowanie wzorców tęczówki oraz ich porównywanie). Eksperymenty te potwierdzają, iż ta metoda stanowi alternatywę dla innych metod klasyfikacji tęczówki opartych np. na CNN (autor uzyskał zwiększoną wydajność i efektywność – Tab. 2.14, niski współczynnik EER=0.18).

Rozdział 3 uzasadnia najpierw, iż mruganie powiekami stanowi cechę charakterystyczną każdego człowieka. Do analizy przebiegu wartości EAR (Eye Aspect Ration) ponownie użyte są sieci syjamskie których skuteczność porównana jest z istniejącymi algorytmami wykorzystującymi ruchy powiek (Tab. 3.2. oraz Tab. 3.3). Eksperymenty wskazują, iż taka sieć syjamska jest w stanie wykryć subtelniejsze różnice w próbkach niż np. klasyfikator VGG16-like.

Rozdział 4 omawia autorskie podejście do multimodalnej biometrii oka ludzkiego. Przedstawiona jest metoda uwierzytelniania w oparciu o interfejs człowiek-komputer (poprzez zastosowanie

sztucznej sieci neuronowej). Syjamskie sieci neuronowe służą tu wytrenowaniu sieci mającej na celu rozróżnienie obrazu otwartych, zamkniętych lub półotwartych oczu (przy wykorzystaniu współczynnika EAR).

Rozdział 5 podsumowuje główne osiągnięcia omawianej dysertacji doktorskiej. *Literatura oraz inne odnośniki* stanowią 131 pozycji. Pracę doktorską zamyka *Spis Tabel i Rysunków* oraz *Streszczenie pracy* po polsku i po angielsku.

II. Opinia o rozprawie doktorskiej

Podsumowując, w przedłożonej pracy doktorskiej po raz pierwszy wykorzystano do wykrywania źrenicy, segmentacji i analizy oka kanał H (Hue – odcień) dostępny w reprezentacji barw obrazu w trybie HSV. W tym celu wykorzystano paraboliczną interpolację brzegu powieki dolnej i górnej z wykorzystaniem algorytmu HSA (przeszukiwanie harmoniczne). W badaniach klasyfikacji wykorzystano sieć syjamską w obu biometrycznych modalnościach. Do analizy tęczówki sieć syjamska analizuje tzw. deskryptory SIFT (wybranych punktów kluczowych). W przypadku biometrii mrugania powiekami sieć syjamska dokonuje analizy przebiegu wartości EAR. Eksperymenty potwierdziły skuteczność obu metod w uwierzytelnieniu danej osoby. Wynik ten potwierdza stawianą hipotezę badawczą o możliwości zbudowania skutecznej fuzji dwumodalnej biometrii opartej na rozpoznaniu tęczówki i charakteru mrugania powiekami. Jest to niewątpliwie sukces całego projektu (wypełniający lukę w budowaniu systemów biometrycznych w oparciu o dwumodalność). Realizacja celu badawczego omawianej dysertacji, wymagała od doktoranta przetestowania wielu praktycznych i zaawansowanych metod powiązanych z biometrią. Ważnym aspektem było zrozumienie ich ograniczeń oraz zalet. W konsekwencji wymagało to zastosowania szeregu teoretycznych i praktycznych rozwiązań, które w sekwencji wzajemnych powiązań i zależności doprowadziły do zadowalającego wyniku określonego w hipotezie dysertacji. Przeprowadzone eksperymenty potwierdziły praktyczną skuteczność tak kompleksowego podejścia.

Doktorant wykazał się w swojej pracy doktorskiej bardzo dobrą znajomością zagadnień naukowych i przedstawił swoje wyniki w sposób klarowny. Cytowana literatura jest prawidłowo dobrana (drobne uwagi odnośnie literatury są podane poniżej w niniejszej recenzji). Naukowe osiągnięcia doktoranta są znaczne a tematyka doktoratu jest interesująca i ważna z punktu widzenia zastosowań oraz teoretycznego zrozumienia złożoności problemu. Implementacja i modyfikacja już istniejących metod oraz tych nowych autorskich z pewnością wymagała od doktoranta nie tylko wiele wysiłku, wiedzy i doświadczenia ale i również krytycznego myślenia (na wielu poziomach) powiązanego z koniecznością wprowadzania korekt, poprawek lub adaptacji rozważanych algorytmów. Większość tych korekt, adaptacji czy innowacyjnych rozwiązań nie da się przewidzieć w praktyce a priori bez ich zrozumienia i implementacji.

Dokonując recenzji niniejszej rozprawy doktorskiej warto wspomnieć o jej drobnych słabościach oraz możliwych alternatywnych podejściach do rozwiązywania niektórych zagadnień poruszanych w dysertacji.

Drobne uwagi:

Praca doktorska napisana jest czytelnym i komunikatywnym językiem. Część wyników badań napisana jest w formie rysunków, wykresów i tabel co bardzo ułatwia zrozumienie powiązanej treści w tym jej aspekt merytoryczny. Dysertacja doktorska łączy w sobie też rezultaty kilku autorskich publikacji [92] i [93] (w tym pominiętą w literaturze pozycję [X] – patrz niżej) co wymusza konieczność utrzymania jednorodnej notacji do wprowadzonych pojęć, ich właściwe

umiejscowienie oraz syntezę uwzględniającą podział tematyczny całego materiału. W tym kontekście pewną formalną słabością pracy jest pojawienie się drobnych usterek językowych oraz niespójności w prezentacji osiągnięć badawczych. W opinii recenzenta nie mają one jednak zasadniczego wpływu na końcową ocenę merytorycznych wyników dysertacji. Jak pokazuje doświadczenie podobne drobne uchybienia pojawiają się przecież w publikacjach wielu uznanych czasopism i materiałów renomowanych konferencji międzynarodowych. Przykłady takich usterek, które recenzent zauważył to np.:

- a) Wykaz skrótów i oznaczeń (str. 4) nie jest kompletny. Np. nie zawiera on często używanych skrótów FAR - false acceptance rate lub EER - Equal Error Rate (str. 68). Skrót EAR - Eye Aspect Ratio (pominięty w wykazie) pojawia się na str. 94 a jest wprowadzony i opisany matematycznie dopiero na str. 104.
- b) Table 2.3, 2.4 i 2.7 zawierają etykietę „Algorytm autora” ale nie dotyczą tego samego algorytmu. Wskazane byłoby np. wprowadzenie numeracji autorskich algorytmów (tych nowych, zmodyfikowanych lub użytych pierwszy raz w konkretnej kombinacji - np. ze str. 52 lub 57). Dodatkowo korzystne byłoby zastosowanie jednorodnych opisów autorskich algorytmów (np. schematy blokowe lub/i opis w krokach – patrz str. 55 versus 57). Kod do detekcji granic źrenicy (str. 54) lepiej umieścić jest w załączniku.
- c) Kompaktowy i jednorodny opis algorytmów pozwoliłby też czytelnikowi lepiej rozróżnić wkład autora w tym też uwypuklić dwumodalność biometrycznego systemu (ich rozłączne i wspólne elementy). W szczególności Sekcja 2.2. raczej powinna stanowić oddzielny rozdział. Znalezienie krzywych wyznaczających granicę oka (górną i dolną powieką) powiązane jest też z mruganiem w modalności 2 (nie tylko z segmentacją tęczęwki oka w modalności 1) tj. z biometrią pasywną (Rozdział 3). W sekcji 2.2 na str. 60 ten kontekst nie jest należycie wyeksponowany.
- d) Drobne korekty edycyjne np. (i) recenzja [100] – zagnieżdżone nawiasy, (ii) równania matematyczne pojawiające się w dysertacji pod sobą powinny mieć znaki równości ustawione w tej samej kolumnie (iii) literówki np. str. 20 (4rta linia od góry) powinno być skali a nie saki.

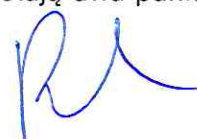
W sekcji Literatura pominięta jest autorska publikacja [X], która stanowi ważną składową przedłożonej pracy doktorskiej ([X] zawarta jest w sekcji 2.2, str. 71-92):

[X] „Iris recognition based on local grey extremum values with CNN-based approaches”, *Machine Graphics and Vision*, 32(3/4), 205-232, 2023 (140pkt punktacja MNiSW za rok 2023).

Pomimo braku publikacji [X] w spisie literatury recenzent uwzględnił ją w swojej końcowej ocenie przedłożonej rozprawy doktorskiej (wynik sumaryczny publikacji to 300 punktów z listy MNiSW).

Sugestie recenzenta:

Zmodyfikowany algorytm harmonicznego przeszukiwania (do wyznaczenia granic powiek parabolą) opierający się na szybkiej interpolacji trójek punktów i wyborze tej paraboli, która ma największą liczbę dopasowujących się punktów (kosztowne obliczenie) można chyba przyspieszyć i uogólnić. W obecnej formie konstruuje się wiele parabol na bazie trójek punktów kandydatów na brzeg. Pominięta jest tu jednak ważna informacja o przecięciu obu powiek mająca charakter globalny (trzy kandydujące punkty blisko siebie to lokalna informacja generycznie wyznaczająca nieoptymalną parabolę). W tym celu by ograniczyć przestrzeń przeszukiwań doboru parabol (do analitycznego określenia brzegu powieki) dobrze byłoby wykorzystać punkty przecięcia obu powiek. Znaleźć je można np. przy pomocy algorytmów do detekcji rogów. Można też rozważyć krzywe wyższego wielomianowe stopnia lub elipsy, które interpolują dwa punkty



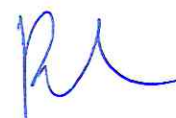
przecięć powiek i minimalizują (aproksymacja reszty punktów) funkcję kosztu mierzącą spełnienie odpowiadającego równania krzywej przez kandydujące punkty (tj. te wyznaczone wcześniej jako potencjalnie punkty brzegowe – np. rys. 2.39). W ten sposób po pierwsze wykorzystana jest dodatkowa globalna informacja zakodowana w odseparowanych punktach przecięcia obu powiek (dwa więzy interpolacyjne). Po drugie, eliminując wielokrotne interpolacje różnych trójek punktów ze zbioru kandydatów oraz kosztowny wybór ich najlepszego dopasowania (zastępując to jedną optymalizacją dopasowania) przyspieszamy cały proces modelowania brzegu powiek. Matematycznie oznacza to szukanie najlepszej aproksymacji z dwoma więzami interpolacyjnymi. Obliczeniowo zadanie to sprowadza się do wyznaczenia współczynników nieznanej krzywej (z ustalonej a priori dopuszczalnej rodziny krzywych) poprzez optymalizację z więzami w postaci dwóch równań (można tu np. stosować numeryczną metodę do optymalizacji z więzami zwaną metodą Karush-Kuhn-Tucker-a).

Założenie, iż brzeg powieki jest elipsą (w tym okręgiem) prowadzi do algebraicznego kwadratowego równania w terminach dwóch zmiennych (x,y) i zależnego od nieznanymi współczynników (reprezentacja implícite brzegu powieki). Zakładając, iż zmienna y da się wyznaczyć z powyższego równania jako funkcja $y(x)$ (co nie zawsze jest możliwe) generycznie uzyskujemy zamiast paraboli $y(x)=Ax^2+Bx+C$ (zastosowanej w doktoracie) funkcję pierwiastkującą (2.55). Stąd też stosowne byłoby rozważyć inne rodziny funkcji $y(x)$ (lub inne wyjściowe równania na (x,y)) do określenia analitycznego wzoru na przybliżenie brzegu powieki.

Jedną z opcji jest potraktowanie brzegu powieki jako krzywej zdefiniowanej parametrycznie tj. w tzw. postaci explicite $(x(t),y(t))$. W ten sposób wyeliminowana jest kwestia możliwości wyznaczenia zmiennej y jako funkcji od zmiennej x . W szczególności dowolna elipsa (przesunięta i obrócona) może być określona zarówno w postaci explicite (5 parametrów: 2 długości osi i środek elipsy oraz kąt jej obrotu) jak i implícite $Ax^2+by^2+Cx+Dy+E=0$ (z ograniczeniem $AB>0$). Dopasowanie danych (rozrzuczonych czy skupionych) do elipsy ze stabilnym algorytmem na wyznaczenie 5ciu nieznanymi parametrów jest analizowane w pracach (w tym dla danych o niskiej rozdzielczości):

1. Z. Szpak, W. Chojnacki, and A. van den Hengel. Guaranteed ellipse fitting with the Sampson distance. In A. Fitzgibbon, S. Lazebnik, P. Perona, Y. Sato, and C. Schmid, editors, Computer Vision - ECCV 2012, 12th European Conf. Computer Vision, Florence, Italy, October 7-13, 2012. Proceedings, Part V, volume 7576 of Lecture Notes in Computer Science, pages 87–100. Springer, 2012.
2. Z. L. Szpak, W. Chojnacki, and A. van den Hengel. Guaranteed ellipse fitting with a confidence region and an uncertainty measure for centre, axes, and orientation. *J. Math. Imaging Vision*, 52(2):173–199, 2015.
3. W. Chojnacki and Z. L. Szpak. Determining ellipses from low-resolution images with a comprehensive image formation model. *J. Opt. Soc. Am. A*, 36(2):212–233, 2019.

Nawiązując do śledzenia procesu mrugania (otwarte, pół zamknięte lub zamknięte powieki) alternatywą do analizy EAR zależnej od pomiarów 6 punktów kontrolnych (wzór (3.1)) wydaje się śledzenie kąta w punktach przecięcia powiek tj. w punktach P1 i P4 (wzór (3.1)). Obliczając styczne granicy górnej i dolnej powieki (krzywe wyznaczone globalnie jak wyżej) w P1 (P4) łatwo



można wyliczyć cosinus szukanego kąta rozwarcia powiek. Miara ta pozwala szybko i dynamicznie mierzyć różne stopnie rozwarcia powiek. Dodatkowo, by przyspieszyć oszacowanie stycznej do powiek w punkcie ich przecięcia można szukać przybliżenia granicy górnej i dolnej powieki tylko poprzez lokalne interpolacje czterech przyległych punktów wyznaczając np. dwie krzywe kubiczne Lagrange'a (omija się w ten sposób kosztowne wyznaczanie współczynników globalnej krzywej z powyższego podejścia). Potrzebne są tu (w P1) tylko cztery pobliskie punkty interpolacyjne do P1 na każdą powiekę, które to można znaleźć lokalnym detektorem krawędzi (lub np. algorytmem z Rys. 2.39). Wydaje się, iż takie podejście przyspieszy kontrolę i pomiar mrugania powiek w czasie zbliżonym do rzeczywistego i może przyspieszyć czas uwierzytelnienia lub/i w kombinacji ze analizą EAR poprawić również dokładność klasyfikacji mrugania (real time Human-Computer-Interface biometry).

III. Merytoryczne osiągnięcia doktoranta

Rezultaty badań pracy doktorskiej mgr inż. K. Malinowskiego (przedłożonej w formie pełnej dysertacji) zostały opublikowane w czasopiśmie *Biocybernetics and Biomedical Engineering* (140pkt lista MNiSW, IF=5.3; pozycja [93]), *Machine Graphics and Vision* (140pkt lista MNiSW za rok 2023, pozycja [X] – patrz Sekcja II: Drobne Uwagi powyżej) oraz jako rozdział w monografii *Advanced Computing and Systems (Seria Lecture Notes in Networks and Systems*, Springer, pozycja [92]) wydanej po wygłoszeniu referatu na międzynarodowej konferencji Doctoral Symposium on Applied Computation and Security Systems (ACSS 2021), Kalkuta, Indie (9-10 kwietnia 2021 r.). Opublikowanie rezultatów badań (300 punktów MNiSW) z przedłożonej dysertacji świadczy o tym, iż badane zagadnienie i tematyka odnoszą się do bieżących kierunków i kluczowych problemów z biometrii stanowiącej ważny nurt badań w dziedzinie Nauk Technicznych (dyscyplina Informatyka Techniczna i Telekomunikacja).

Problem połączenia dwóch typów biometrii jest ważnym zagadnieniem z punktu widzenia praktycznych zastosowań. Doktorant wykazał się niewątpliwie nie tylko niezłomnością badawczą ale i hartem implementacyjno-eksperymentatorskim realizując z sukcesem również inżynierską część projektu doktorskiego.

IV. Wnioski końcowe

W konkluzji stwierdzam, że przedłożona praca doktorska Pana mgr inż. Kamila Malinowskiego pt. „*Dwumodalny biometryczny system do rozpoznawania użytkownika*” **spełnia ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wystawiam jej niniejszym pozytywną ocenę.** Mając na uwadze powyższe, wnoszę bez zastrzeżeń **o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego** w celu uzyskania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja.

Jednocześnie, ze względu na oryginalny charakter uzyskanych wyników, istotności i trudności postawionego problemu oraz moich argumentów wyrażonych powyżej wnioskuję również o **wyróżnienie rozprawy doktorskiej** mgr inż. Kamila Malinowskiego.



Ryszard Kozera