

Szczecin, 14.11.2022

dr hab. inż. Jacek Piskorowski, prof. ZUT

Katedra Inżynierii Systemów, Sygnałów i Elektroniki

Wydział Elektryczny

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Jędzierowskiej
pt.: "Algorytmy komputerowej analizy obrazów w analizie deformacji rogówki oka",
przedstawionej w formie zbioru powiązanych tematycznie artykułów naukowych.

Podstawą formalną opracowania recenzji jest Uchwała nr 68/2022 Rady Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna Politechniki Śląskiej z dnia 20 października 2022 roku, a także pismo o sygnaturze RDIB.002.68.2022 Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna Politechniki Śląskiej prof. dr. hab. inż. Marka Gzika z dnia 26 października 2022 roku. Promotorami opiniowanej rozprawy doktorskiej są prof. dr hab. inż. Robert Koprowski oraz prof. dr hab. n. med. Dorota Tarnawska.

1. Znaczenie podjętej tematyki

Obecnie mamy do czynienia z dynamicznym rozwojem metod analizy i przetwarzania obrazów. Aby w efektywny sposób wykorzystać obraz jako źródło informacji należy przetworzyć go na postać cyfrową, a następnie przeprowadzić odpowiedni proces analizy. Przed rozpoczęciem procesu analizy obrazu konieczne jest jednak polepszenie jego jakości, m.in. poprzez odpowiednią filtrację. Operacje przetwarzania obrazów umożliwiają ich analizę oraz interpretację. Dzięki wykorzystaniu odpowiednich operacji przetwarzania obrazu jesteśmy w stanie pozyskać informacje, które zazwyczaj są poza zasięgiem ludzkiego oka. Metody analizy oraz przetwarzania obrazów są wykorzystywane w wielu dziedzinach nauki

oraz techniki, takich jak medycyna, biologia, robotyka, biometria i wielu innych. Szczególnie istotne jest wykorzystanie tych metod w medycynie. Analiza obrazów medycznych umożliwia przede wszystkim lokalizację stanów chorobowych oraz ich odpowiednią klasyfikację. Dobrym przykładem jest wykorzystanie metod analizy obrazów do diagnostyki narządu wzroku, a w szczególności oceny deformacji rogówki oka. Obecnie dostępne są zaawansowane technologicznie urządzenia do obrazowania narządu wzroku. Opracowano również profilowane algorytmy do analizy obrazów struktur morfologicznych oka. Niemniej jednak konieczne jest poszukiwanie nowych efektywnych metod umożliwiających wykrywanie pełnego zewnętrznego konturu rogówki oka, który w efekcie pozwoli na akwizycję charakterystycznych parametrów deformacji rogówki.

Podjęta przez Doktorantkę tematyka wpisuje się wprost w zakres dyscypliny Inżynieria Biomedyczna. Należy również podkreślić, że tematyka rozprawy doktorskiej jest niezwykle ważna i aktualna z medycznego punktu widzenia. Osiągnięte rezultaty umożliwiają pogłębioną analizę deformacji rogówki oka. W efekcie opracowane metody mają duży potencjał diagnostyczny w okulistyce.

2. Ogólna charakterystyka, zakres i cel rozprawy

Doktorantka zasygnalizowała potrzebę udoskonalenia istniejących metod oraz poszukiwania nowych rozwiązań do analizy obrazów narządu wzroku. W szczególności odniesiono się do możliwości wykorzystania bezkontaktowego tonometru Corvis ST, który dedykowany jest głównie do pomiaru ciśnienia wewnątrzgałkowego. Tonometr Corvis ST jest wyposażony w szybką kamerę Scheimpfluga, która umożliwia rejestrację sekwencji obrazów deformacji rogówki będącej efektem podmuchu powietrza. Doktorantka podkreśliła, że analiza wspomnianej sekwencji obrazów deformacji rogówki umożliwia wyznaczenie istotnych parametrów diagnostycznych, których pomiar był niemożliwy z wykorzystaniem tradycyjnych urządzeń. Odniesiono się do najnowszych badań, w których potwierdzono dużą wartość diagnostyczną tych parametrów (np. w przypadku stożka rogówki). Doktorantka po analizie dostępnej literatury zidentyfikowała brak kompleksowych rozwiązań w zakresie wykrywania pełnego zewnętrznego konturu rogówki oka, który jest niezbędny do wyznaczenia charakterystycznych parametrów deformacji rogówki. Co więcej wykazano, że oprogramowanie tonometru Corvis ST nie dostarcza parametrów pozyskiwanych na podstawie analizy struktury rogówki, a także zidentyfikowano problem związany z interpretacją oraz analizą pozyskanych parametrów.

Przeprowadzona przez Doktorantkę analiza pozwoliła na wskazanie głównych celów pracy, do których zaliczono opracowanie algorytmu wykorzystującego zaawansowane metody przetwarzania obrazów do automatycznego wyznaczania krawędzi rogówki, analizę przydatności diagnostycznej parametrów pozyskiwanych z dynamicznej deformacji rogówki, analizę zmian struktury rogówki oka dla sekwencji obrazów dynamicznej deformacji rogówki, a także opracowanie metody pozwalającej na weryfikację poprawności ustawienia pacjenta podczas badania tonometrycznego. Tak postawione cele pracy doprowadziły do sformułowania następujących tez rozprawy doktorskiej:

- wykorzystanie metod analizy i przetwarzania obrazów pozwala na analizę dynamicznej deformacji rogówki oka,
- możliwe jest zdobycie wiedzy, w jaki sposób parametry rogówki wyznaczone podczas jej dynamicznej deformacji powiązane są ze zmianami chorobowymi rogówki,
- analiza dynamicznej deformacji rogówki pozwala na odniesienie jej do zmian chorobowych rogówki.

Cele oraz tezy pracy zdefiniowano w precyzyjny sposób. Można stwierdzić, że postawione cele pracy są istotne i aktualne na tle obecnego stanu wiedzy w zakresie analizy deformacji rogówki oka. Cele oraz tezy pracy odpowiadają zakresowi i tematyce rozprawy oraz determinują zakres przeprowadzonych badań. Uważam, że podjęcie tematu rozprawy doktorskiej było celowe zarówno ze względów poznawczych, teoretycznych oraz praktycznych. Tezy pracy zostały prawidłowo postawione, natomiast cele główne rozprawy doktorskiej zostały zrealizowane.

3. Struktura rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. Magdaleny Jędzierskiej pt.: "Algorytmy komputerowej analizy obrazów w analizie deformacji rogówki oka" została przedstawiona w formie przewodnika po cyklu 7 publikacji naukowych. Na przedstawiony cykl prac składają się trzy publikacje, w których zawarte zostały oryginalne wyniki badań przeprowadzonych przez Doktorantkę w zakresie wykorzystania algorytmów komputerowej analizy obrazów do analizy deformacji rogówki oka oraz oceny parametrów biomechanicznych w celu wspomagania procesu diagnostyki okulistycznej. Cykl monotematycznego zbioru publikacji uzupełniają cztery prace przeglądowe.

Rozdział pierwszy stanowi wstęp do rozprawy doktorskiej, w którym scharakteryzowano w zwięzły sposób motywację do podjęcia badań w zakresie analizy deformacji rogówki oka z wykorzystaniem bezkontaktowego tonometru Corvis S. W rozdziale drugim przedstawiono cel i tezy pracy. W ramach rozdziału trzeciego omówiono cykl publikacji naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej. Przedstawiono metodologię badań zrealizowanych w ramach rozprawy doktorskiej. Dla każdego artykułu wchodzącego w skład monotematycznego cyklu publikacji naukowych określono cel pracy oraz dokonano szczegółowej analizy przedstawionego problemu. Przedstawiono ponadto oryginalne elementy opracowanych w ramach badań metod. W rozdziale czwartym przedstawiono podsumowanie oraz wnioski końcowe. W rozprawie doktorskiej zawarto ponadto bibliografię zawierającą 41 pozycji (w tym 7 publikacji wchodzących w skład monotematycznego cyklu będącego podstawą rozprawy doktorskiej). Załączniki rozprawy doktorskiej obejmują pełne treści publikacji stanowiących monotematyczny cykl będący podstawą rozprawy doktorskiej, a także oświadczenia o wkładzie procentowym współautorów. Rozprawę doktorską uzupełnia spis rysunków oraz tabel.

4. Cykl publikacji naukowych

W pracy: *Jędzierska M., Koprowski R., Wróbel Z.: Imaging of the anterior eye segment in the evaluation of corneal dynamics. Information Technologies in Medicine 2016; 1: 63–73* przedstawiono przegląd metod obrazowania przedniego odcinka oka pozwalających na ocenę deformacji rogówki oka wywołanej podmuchem powietrza. Jest to typowa praca przeglądowa, w której omówiono obecnie dostępne i wykorzystywane metody i urządzenia umożliwiające obrazowanie przedniego odcinka oka. W pracy wykazano brak standardów w zakresie analizy dynamiki deformacji rogówki oka w trakcie badania ciśnienia wewnątrzgałkowego. Przedstawiono ograniczenia poszczególnych urządzeń w zakresie obrazowania, a także analizy zmian w przednim odcinku oka podczas badania ciśnienia wewnątrzgałkowego metodą podmuchu powietrza. Odniesiono się do tonometru Corvis ST, tonometru Ocular Response Analyzer (ORA), a także połączenia optycznej koherentnej tomografii (OCT) z systemem pomiaru ciśnienia wewnątrzgałkowego metodą podmuchu powietrza. W pracy zasygnalizowano konieczność określenia nowych parametrów charakteryzujących biomechanikę rogówki, które mogłyby wskazywać na konkretne jednostki chorobowe.

W pracy: Jędzierska M., Koprowski R., Wróbel Z.: *Overview of the Ocular Biomechanical Properties Measured by the Ocular Response Analyzer and the Corvis ST. Information Technologies in Biomedicine 2014; 4: 377–386* przedstawiono porównanie tonometrów Corvis ST oraz Ocular Response Analyzer (ORA), które umożliwiają analizę dynamicznej deformacji rogówki oka. Jest to typowa praca przeglądowa, w której omówiono procesy działania poszczególnych urządzeń i w efekcie procesy analizy deformacji rogówki oka z wykorzystaniem tych urządzeń. Omówiono parametry mierzone przez oba urządzenia. Istotną konkluzją z przeprowadzonego przeglądu jest zidentyfikowanie niewykorzystanego jeszcze w pełni potencjału urządzenia Corvis ST do pozyskiwania nowych parametrów biomechanicznych, które umożliwią precyzyjną ocenę deformacji rogówki oka oraz jej progres.

W pracy: Jędzierska M., Koprowski R., Wilczyński S., Krysik K.: *A new method for detecting the outer corneal contour in images from an ultra-fast Scheimpflug camera. BioMedical Engineering Online 2019; 18(1): 115* omówiono problematykę związaną z wyznaczeniem parametrów biomechanicznych rogówki na podstawie obrazów z tonometru Corvis ST. Jest to oryginalna praca, w której zaprezentowano wyniki badań związanych z automatyczną detekcją zewnętrznej krawędzi rogówki oka z serii obrazów pochodzących z tonometru Corvis ST. Opracowaną metodę porównano z powszechnie znanymi i wykorzystywanymi detektorami krawędzi (m.in. operator Sobela, Roberts'a i Cannego). Wykazano wyższość opracowanej metody nad rozwiązaniami znanymi z literatury. Istotnym również jest, że opracowana metoda wykrywania krawędzi jest bardziej odporna na zakłócenia charakterystyczne dla obrazów pochodzących z tonometru Corvis ST niż metoda zaimplementowana w oprogramowaniu tonometru. Wykazano w efekcie, że opracowana metoda może być wykorzystana do pozyskiwania parametrów rogówki oka.

W pracy: Jędzierska M., Koprowski R.: *Novel dynamic corneal response parameters in a practice use: a critical review. BioMedical Engineering Online 2019; 18(1)* omówiono parametry wyznaczone na podstawie analizy zdjęć dynamicznej deformacji rogówki w kontekście ich przydatności w praktyce klinicznej. Jest to typowa praca przeglądowa, w której scharakteryzowano wiarygodność diagnostyczną parametrów dynamicznej odpowiedzi rogówki. Odniesiono się przede wszystkim do amplitudy deformacji, parametrów sztywności (SP-A1 i SP-HC), parametru biomechanicznie skorygowanej wartości ciśnienia wewnątrzgałkowego (bIOP), parametru Corvis

Biomechanical Index (CBI), a także parametru Tomography and Biomechanical Index (TBI). Podkreślono, że parametry dynamicznej odpowiedzi rogówki mogą być wykorzystywane do wspomagania diagnostyki okulistycznej i oceny parametrów rogówki oka.

W pracy: *Jędzierska M., Koprowski R., Wilczyński S.: Analysis of changes in corneal structure during intraocular pressure measurement by air-puff method. Information Technology in Biomedicine 2022; 155-167* dokonano analizy struktury rogówki oka w trakcie badania tonometrycznego. Jest to oryginalna praca, w której zaprezentowano autorską metodologię umożliwiającą analizę struktury rogówki oka w trakcie badania ciśnienia wewnątrzgałkowego metodą bezkontaktową. Opracowano algorytm umożliwiający automatyczne śledzenie zmian widocznych na zdjęciach przekrojów poprzecznych rogówki oka pozyskanych podczas badania ciśnienia wewnątrzgałkowego. Zaproponowane w pracy parametry oceny zmian struktury rogówki w czasie w postaci przemieszczenia bezwzględnego badanego obszaru oraz wartości jego maksymalnego odchylenia umożliwiają ilościową ocenę analizowanych zmian.

W pracy: *Jędzierska M., Koprowski R., Wróbel Z.: Limitations of Corneal Deformation Modelling During IOP Measurement: a Review. Information Technologies in Biomedicine 2019; 469-480* dokonano analizy ograniczeń związanych z modelowaniem biomechanicznych właściwości gałki ocznej podczas pomiaru ciśnienia wewnątrzgałkowego. Jest to typowa praca przeglądowa, w której omówiono wpływ materiału rogówki oka, geometrii modelu, obecności płynów we wnętrzu gałki ocznej, wibracji rogówki, a także warunków brzegowych modelu.

W pracy: *Jędzierska M., Koprowski R., Wilczyński S., Tarnawska D.: The use of infrared thermal imaging in tonometry with a Scheimpflug camera. J. Therm. Biol 2021; 96:102823* zaprezentowano metodę oceny poprawności pomiaru ciśnienia wewnątrzgałkowego w zależności od ułożenia głowy pacjenta podczas badania tonometrem bezkontaktowym z wykorzystaniem kamery termowizyjnej. Jest to oryginalna praca, w której przedstawiono wyniki pomiarów termograficznych twarzy pacjentów przed oraz po badaniu ciśnienia wewnątrzgałkowego metodą bezkontaktową. Opracowano metodę automatycznej korekty położenia obrazów (stabilizacja obrazów w zakresie przesunięcia w pionie i w poziomie oraz stabilizacja kątowna obrazów). Przeprowadzone badania umożliwiły jakościową ocenę zmiany temperatury w miejscach styku twarzy pacjenta z tonometrem przed i po

badaniu. Opracowana metoda jest w stanie wspomóc lekarzy okulistów w zakresie oceny poprawności procesu pomiaru ciśnienia wewnątrzgałkowego.

Monotematyczny cykl publikacji naukowych, będący podstawą rozprawy doktorskiej, składa się z artykułów opublikowanych w czasopismach zagranicznych *Biomedical Engineering Online* oraz *Journal of Thermal Biology*, a także w monografiach z serii *Advances in Intelligent Systems and Computing* wydawanych przez Springer. Trzy artykuły wchodzące w skład cyklu to publikacje oryginalne, w których zawarte zostały wyniki badań przeprowadzonych przez Doktorantkę. Pozostałe cztery prace to artykuły przeglądowe. Zbiór publikacji został uzupełniony dobrze przygotowanym opisem bibliometrycznym, zgodnym z obowiązującym wykazem czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych. Dla trzech publikacji wykazano wysoki współczynnik *Impact Factor*. Zbiór tematycznie dobranych i starannie omówionych 7 współautorskich publikacji w dobrze przygotowanej merytorycznie oraz redakcyjnie dysertacji wychodzi naprzeciw postawionej tezie. Istotnym jest, że Doktorantka jest wiodącym współautorem wszystkich publikacji. Z przedstawionych oświadczeń o udziale procentowym poszczególnych współautorów wynika, że Doktorantka posiada minimum 85% udziału w każdej z publikacji wchodzących w skład cyklu. Analizując przedstawiony cykl publikacji należy jednoznacznie stwierdzić, że jest on wyczerpujący i nie budzi żadnych zastrzeżeń, a wartość naukowa zestawionych prac jest wysoka. Przeprowadzone przez Doktorantkę prace badawcze oraz studia literaturowe są spójne tematycznie, składają się w logiczną całość i dotyczą zagadnień związanych z analizą obrazów rogówki oka w celu poprawy procesu diagnostyki okulistycznej oraz poznania procesów zachodzących podczas dynamicznego odkształcenia rogówki w trakcie badania ciśnienia wewnątrzgałkowego tonometrem bezkontaktowym. Istotnym również jest, że wszystkie publikacje doczekały się niezależnych recenzji, uprawniających do wydania artykułów w czasopismach oraz monografiach naukowych.

5. Ogólna ocena rozprawy

Autorka rozprawy doktorskiej zrealizowała postawione cele w sposób adekwatny, używając do tego właściwej metodyki badań. Przyjęte założenia są uzasadnione. W sposób przejrzysty odniesiono się do źródeł. Do najistotniejszych osiągnięć Doktorantki należy zaliczyć przede wszystkim:

- opracowanie odpornej na zakłócenia metody automatycznego wyznaczania zewnętrznej krawędzi rogówki, umożliwiającej wykrycie jej pełnego konturu,
- opracowanie nowych parametrów dynamicznej deformacji rogówki oka związanych ze zmianami jej struktury podczas badania ciśnienia wewnątrzgałkowego metodą bezkontaktową,
- analizę przydatności diagnostycznej parametrów dynamicznej deformacji rogówki oka,
- opracowanie metody analizy struktury rogówki oka umożliwiającej śledzenie charakterystycznych zmian jej struktury,
- opracowanie nieinwazyjnej metody weryfikacji poprawności ustawienia pacjenta podczas badania tonometrycznego wykorzystującej obrazowanie termowizyjne.

Istotnym jest, że opracowane przez Doktorantkę metody zostały zweryfikowane na rzeczywistych obrazach pochodzących z tonometru Corvis ST. Przedstawione w monotematycznym cyklu publikacji metody analizy obrazów mogą być wykorzystywane w do diagnostyki chorób oczu, trójwymiarowej prezentacji odkształcenia rogówki oka, a także poprawy jakości pomiarów ciśnienia wewnątrzgałkowego tonometrem Corvis ST.

6. Uwagi krytyczne

Uwagi ogólne:

- W treści rozprawy doktorskiej stwierdzono, że analiza dynamicznego odkształcania rogówek zmienionych chorobowo (np. u pacjentów ze stożkiem rogówki) dostarcza nowych, diagnostycznie istotnych informacji. W jaki sposób te nowe informacje przekładają się na precyzję diagnostyki i predykcję rozwoju stożka rogówki?
- W pracy dotyczącej metody wykrywania zewnętrznej krawędzi rogówki na obrazach z tonometru bezkontaktowego Corvis ST zadeklarowano, że otrzymane wartości położenia zewnętrznej krawędzi rogówki porównano z położeniem zewnętrznej krawędzi wyznaczonej przez eksperta. Jaka metodą posługiwał się ekspert? Czy wszystkie obrazy oceniał ten sam ekspert?
- W pracy dotyczącej opracowania metodologii umożliwiającej analizę struktury rogówki oka w trakcie badania ciśnienia wewnątrzgałkowego metodą bezkontaktową zadeklarowano, że badaniom poddana była grupa 20 pacjentów. Czy liczebność tej

grupy była na tyle duża, aby potwierdzić efektywność i skuteczność zaproponowanej metody? Dlaczego grupa obejmowała tylko zdrowych pacjentów skoro opracowana metoda ma wspomagać analizę deformacji rogówki i w efekcie diagnostykę zmian chorobowych w strukturze rogówki?

- W pracy dotyczącej opracowania metody oceny poprawności pomiaru ciśnienia wewnątrzgałkowego w zależności od ułożenia głowy pacjenta zadeklarowano, że wykonanie badań na grupie 10 pacjentów pozwoliło na uzyskanie jakościowej oceny zmiany temperatury w miejscach styku twarzy pacjenta z tonometrem przed i po badaniu. Czy liczebność tej grupy była na tyle duża aby potwierdzić skuteczność zaproponowanej metody?
- Jakie są kierunki dalszych badań w zakresie tematyki rozprawy doktorskiej? Czy Doktorantka widzi potencjał do rozwoju opracowanych metod?

Uwagi redakcyjne:

- Rozprawa doktorska zawiera drobne usterki językowe w postaci błędów stylistycznych oraz interpunkcyjnych.

Wskazane uwagi krytyczne i komentarze mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na ogólnie pozytywną ocenę wyników zawartych w opiniowanej rozprawie doktorskiej.

7. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że mgr inż. Magdalena Jędzierska wykazała się dużą wiedzą z zakresu analizy i przetwarzania obrazów. Rozprawa doktorska mgr inż. Magdaleny Jędzierskiej w formie zbioru powiązanych tematycznie artykułów naukowych pt.: "Algorytmy komputerowej analizy obrazów w analizie deformacji rogówki oka" jest oryginalnym, interesująco przedstawionym, uzasadnionym i twórczym wkładem w dyscyplinę Inżynieria Biomedyczna. Niniejsza rozprawa doktorska zawiera poprawnie sformułowany i rozwiązany problem badawczy oraz posiada bardzo duży aspekt praktyczny. Stanowi zatem oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

W efekcie stwierdzam, że mgr inż. Magdalena Jędzierska spełnia wymagania określone w art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003 poz. 595 z późn. zm.) oraz

w art. 179 ust. 1 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. - Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1669 z późn. zm.). W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Magdaleny Jędzierowskiej do publicznej obrony rozprawy doktorskiej przed Radą Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna Politechniki Śląskiej.

J. Pi —