

16 stycznia 2023 r.

prof. dr hab. inż. Paweł Strumiłło Instytut Elektroniki
Politechniki Łódzkiej

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY DYSCYPLINY NAUKOWEJ INŻYNIERIA BIOMEDYCZNA
W POLITECHNICE ŚLĄSKIEJ

Tytuł rozprawy: Algorytmy komputerowej analizy obrazów w analizie deformacji rogówki oka

Autor rozprawy: mgr inż. Magdalena Jędzierowska

Promotorzy: prof. dr hab. Robert Koprowski, prof. dr hab. n. med. Dorota Tarnawska

1. **Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska jest poświęcona badaniom diagnostycznym oka polegających na ocenie ciśnienia wewnątrz gałki ocznej (ang. interocular pressure — 10P). Badania takie nazywa się tonometrią i są przeprowadzane wg różnych procedur badań. Ciśnienie wewnątrzgałkowe jest parametrem, który ma zasadnicze znaczenie we wczesnym diagnozowaniu chorób oczu związanych ze wzrostem ciśnienia wewnątrzgałkowego m.in. jaskry. Od wielu lat złotym standardem w tych badaniach jest tzw. tonometria aplikacyjna wg Goldmana, umożliwiającą pomiar ciśnienia wewnątrzgałkowego na skutek wywieranej siły odkształcającej krzywiznę rogówki. Jest to metoda kontaktowa i wymaga uprzedniego znieczulenia oka. W ostatnich latach na znaczeniu zyskuje tonometria bezkontaktowa, w której wykorzystuje się skupiony strumień powietrza skierowany na gałkę oczną. Rozwijane są również badania, w których oprócz pomiaru 10P analizowane są również parametry związane z dynamiczną deformacją rogówki podczas bezkontaktowego badania tonometrycznego. Tę właśnie problematykę badawczą podjęła Autorka rozprawy. We wstępnej części pracy bardzo dobrze ją uzasadniła i wyjaśniła.

Praca ma charakter teoretyczno-doświadczalny, w której Autorka sformułowała następujące tezy rozprawy:

1. *Wykorzystanie metod analizy i przetwarzania obrazów pozwala na analizę dynamicznej deformacji rogówki oka.*
2. *Możliwe jest zdobycie wiedzy, w jaki sposób parametry rogówki wyznaczone podczas jej dynamicznej deformacji powiązane są ze zmianami chorobowymi rogówki.*
3. *Analiza dynamicznej deformacji rogówki pozwala na odniesienie jej do zmian chorobowych rogówki.*

II. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy, świadczący o dostatecznej wiedzy autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Przegląd tematyki badawczej dotyczącej badania deformacji rogówki oka wywołanej strumieniem powietrza Autorka przeprowadziła w pracach [1, 2], które są cytowane w autoreferacie. W wyniku przeprowadzonego aktualnego przeglądu stanu badań Autorka stwierdziła, że obecnie jest brak złotego standardu w zakresie oceny deformacji rogówki podczas badania ciśnienia wewnątrzgałkowego metodą bezkontaktową. Przeprowadziła dyskusję parametrów pozyskiwanych ze współcześnie stosowanych tonometrów (Orbscan II, Pentacam, Corvis ST, Ocular Response Analyzer) oraz techniki łączącej optyczną tomografię koherentną (ang. optical coherent tomography — OCT) z tonometrią bezkontaktową. Z przeprowadzonego przeglądu literatury i urządzeń obecnie stosowanych do diagnozy oka wywnioskowała o potrzebie rozwijania badań w kierunku analizy większej liczby parametrów charakteryzujących dynamiczne zmiany kształtu rogówki podczas badań tonometrycznych. Przeglądowe prace Autorki [1, 2] cytowane w rozprawie są z lat 2014 i 2016, jednak w autoreferacie Autorka powołuje się również na najnowsze prace dotyczące tematyki rozprawy, m.in. z lat 2020, 2021 i 2022.

III. Czy autor rozwiązał poprawnie postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody?

Zgodnie z postawionymi hipotezami badawczymi Autorka rozprawy pojęła się realizacji następujących zadań badawczych:

Ad. 1. Opracowanie algorytmu wykorzystującego zaawansowane metody przetwarzania obrazów do automatycznego wyznaczania krawędzi rogówki.

Materiał badawczy w tym zadaniu pracy został zebrany w postaci zbioru 15400 obrazów zarejestrowanych za pomocą tonometru Corvis ST podczas badania ciśnienia wewnątrzgałkowego 10 pacjentów. Autorka opracowała procedurę wykrywania zewnętrznej krawędzi rogówki. Na metodę tę składają się metody: filtracja medianowa, binaryzacja obrazu za pomocą metody progowania lokalnego Sauvola i Pietikainena, operacja morfologiczna otwierania oraz metod etykietowania obrazu binarnego, m.in. z zastosowaniem neuronowej sieci konwolucyjnej (CNN). W zaproponowanej przez Autorkę metodzie uzyskano najlepszą zgodność z anotacjami eksperta wg miary błędu wyznaczonego jako średnia modułów różnic w porównaniu ($\hat{o}=0,16\%$) w porównaniu do innych technik wyznaczania obrazów gradientowych takich jak operator gradientowy Robertsa i Sobela oraz metody Cannyego. Wynik Autorki należy uznać za bardzo dokładny.

Proszę Autorkę o komentarz do następujących elementów zaproponowanej metody:

- w jaki sposób ekspert dokonywał oznaczenia krawędzi rogówki i jaką dokładność mają oznaczenia eksperta?
- w zaproponowanym porównaniu metody wyznaczania gradientu obrazu wg **Robertsa** i **Sobela** i **Cannyego** są ostatnim etapem przetwarzania, podczas gdy wynik metody binaryzacji Sauvola i Pietikainena podlegał następnie operacji morfologicznej i detekcji za pomocą sieci neuronowej. Czy uzupełnienie porównywanych metod, tj. Robertsa, Sobela

i Cannego o te etapy przetwarzania i analizy obrazu mogłoby dać równie dobre rezultaty wykrywania krawędzi rogówki?

- czy Autorka rozprawy rozważała możliwość trenowania sieci konwolucyjnej bezpośrednio na obrazie źródłowym bez konieczności stosowania etapów przetwarzania i binaryzacji obrazów?

Ad. 2. Analiza przydatności diagnostycznej parametrów pozyskiwanych z dynamicznej deformacji rogówki.

W cytowanej w rozprawie pracy współautorskiej [4] przeprowadzono istotną dyskusję nad przydatnością różnych paramentów charakteryzujących dynamiczną deformację rogówki. Z przeprowadzonej analizy sformułowano następujące wnioski:

- amplituda deformacji rogówki (ang. Deformation Amplitude Ratio) oraz parametry związane ze sztywności rogówki (SP-AI, SP-HC) są uważane za wskaźniki przydatne w ocenie wyniku zabiegu refrakcyjnego rogówki, wartościowe jest zestawienie tabelaryczne zmian wartości tych parametrów (tabela na str. 17 pracy) po przeprowadzeniu różnych zabiegów chirurgicznych oka, – parametr związany z ciśnieniem wewnątrzgałkowym (ang. Biomechanically-Corrected Intraocular Pressure - 10P) jest niezależny zarówno od własności biomechanicznych rogówki oraz od centralnej grubości rogówki i wieku pacjenta, – parameter Corvis Biomechanical Index (CBI) może służyć do wykrywania u pacjentów tzw. stożka rogówki, który jest szczególnie skuteczny w połączeniu z wartościami parametru Tomography and Biomechanical Index (TBI).

Wnioski z tej dyskusji są zbieżne z wnioskami opublikowanymi w najnowszych pracach w literaturze światowej [28, 36].

Ad. 3. Analiza zmian struktury rogówki oka dla sekwencji obrazów dynamicznej deformacji rogówki

Autorka podjęła wątek badawczy, nie badany we wcześniej publikowanych pracach, koncentrujący się na analizie zmian w strukturze rogówki na podstawie obrazów pozyskiwanych z tonometru bezkontaktowego Corvis ST. Zastosowano odpowiednio zaprojektowaną sekwencję metod przetwarzania i analizy obrazów. Do oryginalnych elementów zaproponowanej procedury należy uznać: lokalną metodę progowania obrazu wykorzystującą średnią i standardowe odchylenie obrazu w analizowanych oknach oraz metodę do ilościowej analizy śledzonych przemieszczeń przekrojów rogówki. Zaproponowana procedura umożliwiła śledzenie ruchu rogówki podczas badania oraz jego parametryzację na podstawie wartości przemieszczenia bezwzględnego badanego obszaru (Mn) oraz maksymalnego przemieszczenia (d). W szczególności pokazano, że parametr d u pacjentów zdrowych przyjmował duże wartości w środkowym fragmencie rogówki i są to wartości wyraźnie większe niż parametr Mn. Zatem parametry te mogą stanowić istotne wskaźniki w dyskryminacji chorób oczu. Na ten dalszy kierunek prac wskazała Autorka rozprawy. Zwróciła też uwagę na potencjalną wartość wyznaczanych parametrów, które mogą być wykorzystane w modelach biomechanicznych oka.

Ad. 4. Opracowanie metody pozwalającej na weryfikację poprawności ustawienia pacjenta podczas badania tonometrycznego

Autorka rozprawy zaproponowała oryginalną metodę oceny poprawności ustawienia głowy pacjenta podczas badania tonometrycznego. Jak zaznaczono nieprawidłowe ustawienie głowy, w tym wywieranie zbyt dużej siły na podparcia urządzenie może skutkować błędnymi pomiarami. Zaproponowana metoda polega na pomiarze termograficznym twarzy pacjenta przed i po pomiarze tonometrycznym oraz na porównaniu obydwu termogramów. Pokazano, że metoda ta jest skuteczna w lokalizacji miejsc kontaktu twarzy pacjenta z urządzeniem, która ma temperaturę otoczenia, tj. niższą niż temperatura ciała pacjenta. Wymagana jest jednak dodatkowa weryfikacja postawionej hipotezy tj. odpowiedzi na pytanie: Jak można powiązać zmierzone rozkłady zmian temperatury ciała z prawidłowym położeniem głowy pacjenta oraz oceną siły docisku głowy do urządzenia pomiarowego? Czy zaproponowana metoda może być stosowana do tonometrów różnych producentów.

IV. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

We współcześnie wykonywanych badaniach tonometrycznych stosuje się standardowo przyjęty zestaw parametrów diagnostycznych wykorzystanych w ocenie ciśnienia wewnątrzgałkowego. Autorka zaproponowała pogłębioną analizę obrazów rejestrowanych podczas dynamicznych odkształceń rogówki, m.in. zaproponowała oryginalną procedurę wyznaczenia zewnętrznej krawędzi rogówki oraz metodę ilościowej analizy śledzonych przemieszczeń przekrojów rogówki. Zaproponowała również technikę analizy obrazów termowizyjnych, do oceny ustawienia głowy pacjenta podczas bezkontaktowego badania tonometrycznego. Przeprowadzone badania Autorka podsumowała we współautorskich artykułach i referatach naukowych (w tym trzech publikacji w czasopiśmie o wysokim współczynniku IF) opublikowanych w latach 2014–2021. W przedłożonym cyklu publikacji Autorka ma współautorski wkład nie mniejszy niż 85%.

V. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego przedstawienia uzyskanych wyników i ich interpretacji (zwięzłość, jasność)?

Opis osiągnięć badawczych Autorki rozprawy został przedstawiony w postaci autoreferatu stanowiącego przewodnik po publikacjach naukowych oraz dwóch załączników. Pierwszy załącznik zawiera pełne teksty artykułów naukowych wchodzących w skład cyklu publikacji a drugi zawiera oświadczenia o wkładzie procentowym współautorów publikacji. Autoreferat jest napisany dobrym językiem technicznym o odpowiednim poziomie szczegółowości dobrze objaśniającym osiągnięcia badawcze Autorki rozprawy.

VI. Jakie są słabe strony rozprawy i ewentualnie jej główne wady?

Uważam, że tezy 2. i 3. rozprawy w dużym stopniu definiują tę samą hipotezę badawczą, tj. możliwość powiązania badanych parametrów rogówki wyznaczanych podczas jej dynamicznej deformacji ze zmianami chorobowymi rogówki.

Moje drobne uwagi krytyczne dotyczą warstwy edycyjnej pracy. Bardzo przydatny byłby wykaz

skrótów i oznaczeń, którego nie zamieszczono w autoreferacie. Autorka w opisach stosuje wiele skrótów, m.in. w odniesieniu do parametrów diagnostycznych wykorzystywanych w tonometrii. W autoreferacie nie zamieszczono również streszczeń osiągnięć badawczych Autorki (zarówno w języku polskim i angielskim).

VII. Co wniosła rozprawa do nauki i/lub techniki oraz ocena rozprawy

Autorka rozprawy wykazała, że zastosowanie metod przetwarzania i analizy obrazów umożliwia opracowanie nowej jakościowej i ilościowej analizy dynamicznej deformacji rogówki oka podczas bezkontaktowego badania tonometrycznego. Opracowane metody zostały poddane weryfikacji dla danych zebranych podczas badań tonometrycznych przeprowadzonych u 110 pacjentów. Badania te wykonano w Oddziale Okulistyki Okręgowego Szpitala Kolejowego w Katowicach. Za oryginalny wkład Autorki do dyscypliny inżynierii biomedycznej uważam opracowanie zestawu algorytmów do detekcji zewnętrznej krawędzi rogówki oraz śledzenie zmian jej struktury podczas dynamicznej deformacji rogówki. Dla wyników tych badań uzyskano bardzo dobrą zgodność z oznaczeniami lekarzy specjalistów. Badania Autorki inicjują nowy kierunek badań diagnostycznych oka, w których dane medyczne mogą być wzbogacone o nowe parametry wyznaczone z obrazów pozyskiwanych w badaniach tonometrycznych.

Wniosek końcowy

Stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska spełnia wymagania Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym z 14 marca 2003 roku, Dziennik Ustaw Nr 65, poz. 595 z późn. zm. oraz Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora. Wniosuję o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Jędzierowskiej do publicznej obrony.

Paweł Strumiłło