

prof. dr hab. Piotr Targowski
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

Toruń. 10.07.2022

PRZEWODNICZĄCY RADY DYSCYPLINY
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika

prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg



Ocena rozprawy doktorskiej

pt. „Automatic parameterization of human retina image”
przedstawionej Radzie Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki
Poznańskiej przez panią mgr inż. Agnieszkę Stankiewicz

Ocena doboru tematu, celu i tezy naukowej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska poświęcona jest rozwiązaniu konkretnego zagadnienia z zakresu automatycznej analizy obrazu uzyskiwanego z badania oka ludzkiego z wykorzystaniem Optycznej Koherencyjnej Tomografii (OCT). Jakkolwiek technika OCT znana jest od lat 90tych XX w. i wraz początkiem XXI w. stała się procedurą medyczną stosowaną powszechnie w diagnostyce oka, jej specyfika związana z pozyskiwaniem wielkiej ilości danych cyfrowych, wymaga ciągłego rozwoju metod automatycznej i półautomatycznej obróbki danych. Sprzyja to uzyskaniu rezultatów w formie zwartej i sparametryzowanej, co jest pożądane dla poprawnego diagnozowania, a szczególnie dla diagnozowania porównawczego zmian chorobowych zachodzących w długiej skali czasowej. Pomimo niewątpliwych postępów w tej dziedzinie mających swój wyraz zarówno w literaturze fachowej jak i implementacji do oprogramowania dostarczanego wraz z komercyjnymi instrumentami medycznymi, zagadnienie analizy obrazów OCT ma nadal duży potencjał badawczy. Rozprawa doktorska pani mgr inż. Agnieszki Stankiewicz dobrze wpisuje się w tę tematykę i przynosi wiele nowych i interesujących rezultatów. Kluczowym problemem w analizie danych OCT jest wiarygodna i poprawna segmentacja obrazów, to jest wydzielenie z map pikselowych krzywych (w wersji 3D - powierzchni) rozdzielających poszczególne warstwy anatomiczne badanej struktury – w tym przypadku warstw siatkówki i okołosiatkówkowych oka człowieka zarówno zdrowego, jak i zmienionego patologicznie. Segmentacja ta jest niezbędna dla dalszej numerycznej analizy struktur. Jak Autorka słusznie zauważa, w praktyce diagnostycznej uzyskuje się obrazy o różnej jakości, często istotnie zaszumione i o niskim kontraście struktur. Ze wskazań medycznych oraz z uwagi na komfort pacjenta zazwyczaj nie jest możliwe powtórzenie lub wydłużenie badania i efekcie należy stosować rozbudowane techniki analizy danych, nakierowane na maksymalne wykorzystanie dysponowanych danych.

Celem pracy było opracowanie procedur numerycznej analizy danych pozyskanych z komercyjnego tomografu OCT dobrej klasy umożliwiających pogłębioną analizę 3D struktury siatkówki oraz opis topografii złącza szkliskowo-siatkówkowego. Odwarstwienie ciała szliskiego od błony granicznej wewnętrznej siatkówki powoduje powstanie patologii zwanej trakcją szkliskowo-siatkówkową. W obrazowaniu OCT uwidacznia się wówczas błona graniczna tylna ciała szkliskowego jako odrębna struktura, którą można poddać odrębnej segmentacji. Trudność, a tym samym znaczenie rezultatów zawartych w rozprawie, wynika z bardzo słabej widoczności tej błony w badaniu OCT. Powoduje to, że procedury segmentacji uwzględniające tę błonę nie są dostępne w oprogramowaniu komercyjnym. W szczególności cel rozprawy został realizowany poprzez:

- poprawę skuteczności segmentacji struktur siatkówki w przypadku tomogramów o niskiej jakości,
- opracowanie metody segmentacji umożliwiającej analizę ilościową struktury złącza szklistkowo-siatkówkowego,
- zdefiniowanie i opracowanie metody uzyskiwania parametrów złącza szklistkowo-siatkówkowego przydatnych w diagnozowaniu medycznym – we współpracy z partnerem medycznym.

Teza rozprawy została sformułowana przez Autorkę następująco (w tłumaczeniu z j. angielskiego): *dokładna segmentacja i parametryzacja zmian patologicznych w obszarze złącza szklistkowo-siatkówkowego wizualizowanych z wykorzystaniem trójwymiarowego obrazowania OCT może być uzyskana poprzez:*

- *odpowiedni dobór metod poprawy jakości obrazu dla segmentacji siatkówki opartej na teorii grafów,*
- *precyzyjną segmentację przestrzeni ponadsiatkówkowej,*
- *zastosowanie metod automatycznej parametryzacji obszaru złącza szklistkowo-siatkówkowego.*

W świetle rezultatów zaprezentowanych w rozprawie uznaję tę tezę na udowodnioną. Ponadto, zaproponowane rozwiązania szeroko korzystają z metod, które z pewnością można zaliczyć do automatyki pomiaru. Co więcej, automatyzacja jest konieczną cechą stosowanych procedur, wymuszoną przez rozmiar danych oraz wymóg zapewnienia braku wpływu indywidualnych preferencji osoby opracowującej dane na rezultat. Tak więc nie ulega dla mnie wątpliwości, że recenzowana praca mieści się z zakresie dyscypliny „Automatyka, elektronika i elektrotechnika”.

Ocena zastosowanej metody i uzyskanych wyników

Podstawowym metodologicznym założeniem rozprawy było uzyskanie rezultatów przydatnych w praktyce klinicznej. Stąd punktem wyjścia było oparcie pracy o zbiór rezultatów badań OCT na grupie 102 osób złożonej zarówno ze zdrowych ochotników, jak i pacjentów ze zmianami patologicznymi w obrębie szklistki. Zbiór takich danych, pod nazwą CAVRI, uzyskano dzięki współpracy z Uniwersytetem Medycznym w Poznaniu za pomocą komercyjnego tomografu OCT Avanti RTvue. W tym kontekście wybór instrumentu komercyjnego, stosowanego w oftalmologii, jest w pełni uzasadniony. Dane to, po niezbędnej eliminacji przypadków z różnych względów niemożliwych do analizy, posłużyły zarówno do testowania technik poprawy jakości obrazu, metod segmentacji siatkówki z wykorzystaniem teorii grafów jak też do treningu i walidacji rezultatów uczenia maszynowego.

Istotnym, zauważonym przez Autorkę, problemem mającym wpływ na prawidłową segmentację obrazów OCT jest obecność szumu, związanego przede wszystkim z przestrzenną spójnością stosowanego promieniowania. W rozdziale drugim Autorka zawarła wyczerpujący przegląd literatury w zakresie stosowanych metod redukcji szumu, a w rozdziale trzecim przetestowała wybrane metody. Podobna metodologia, która można nazwać eksperymentem numerycznym, została zastosowana w przypadku optymalizacji techniki segmentacji siatkówki w oparciu o teorię grafów oraz analizy technik uczenia maszynowego. Utrzymany jest przy tym podział na wyczerpującą analizę literaturową w rozdziale 2 i opis eksperymentów numerycznych w rozdziałach 3 (segmentacja siatkówki) i 4 (segmentacja przestrzeni ponadsiatkówkowej). Analiza rezultatów była możliwa dzięki wprowadzeniu przez Autorkę numerycznych parametrów charakteryzujących jakość uzyskanej segmentacji w

stosunku to manualnej segmentacji eksperckiej, dokonanej przez lekarzy ze współpracującego szpitala. Ważnym spostrzeżeniem Autorki jest wpływ obszarów o niskim kontraście na poprawność segmentacji. Jeżeli występują one w obszarach położonych na skraju obszaru skanowania, są efektem aparaturowym wynikającym ze sposobu skanowania siatkówki tomografem OCT poprzez obiektyw o graniczonej aperturze numerycznej i przez źrenicę oka. Autorka proponuje tutaj zabieg drastyczny, polegający na przycięciu analizowanego obrazu po bokach. Spodziewam się, że podejście to wynika z dążenia do zachowania standardowego protokołu pomiarowego w aspekcie obszaru skanowania ($7 \times 7 \text{ mm}^2$). Wydaje mi się, że lepiej by było ograniczyć obszar badania, co dałoby albo szybsze, bardziej komfortowe badanie albo gęstszy raster pixeli, co zazwyczaj poprawia jakość obrazu. Warto też zaznaczyć, że uzyskane tutaj szczegółowe rekomendacje (15% zakresu) zależą od wyboru instrumentu, w szczególności ogniskowej obiektywu oraz protokołu badania, w szczególności czy stosowane było farmakologiczne rozszerzenie źrenicy. Ponadto Autorka zaproponowała interesujący sposób rozszerzenia techniki segmentacji grafem na korelacje pomiędzy kolejnymi B-skanami, słusznie zauważając, że z uwagi na ciągłość struktur taki zabieg jest uprawniony.

Rozdział czwarty rozprawy poświęcony jest nowatorskiej propozycji wykorzystania metody uczenia maszynowego do identyfikacji błony granicznej tylnej ciała szklistego jako struktury podlegającej segmentacji. Jest to zagadnienie nowe, niedostępne w oprogramowaniu komercyjnym. Podobnie jak w przypadku segmentacji siatkówki grafem zagadnienie to jest opracowane starannie, wsparte szczegółowym rozpoznaniem literaturowym. Autorka zaimplementowała i przetestowała cztery architektury sieci neuronowej wraz z odpowiednio sparametryzowanymi funkcjami kosztu. Dodatkowo, z uwagi na ograniczony rozmiar zbioru uczącego wprowadzono augmentację (wzbogacenie) danych, co w znaczący sposób poprawiło jakość segmentacji. Autorka zaproponowała również pewne skuteczne metody poprawy precyzji segmentacji poprzez dodatkowy kanał wejściowy dla obrazów oraz modyfikację rozmiaru jądra konwolucji. Ten drugi wynik wydaje mi się szczególnie ciekawy w aspekcie powiązania z fizycznymi własnościami analizowanego obrazu. Byłby interesujące powiązać go z rzeczywistą optyczną rozdzielczością analizowanych obrazów. Jak wynika z rozprawy, analizowany B-skan pochodzący z obrazowania 3D miał wymiary $385 \times 640 \text{ px}$ albo $7 \times 2 \text{ mm}^2$. Daje to fizyczny rozmiar pixela: $18 \times 3,1 \mu\text{m}^2$. Niestety nie znalazłem w rozprawie danych dotyczących optycznej rozdzielczości stosowanego instrumentu. Porównanie być może dostarczyłoby wskazówki, czy nie-kwadratowe jądro związane jest z lokalnymi własnościami struktury obrazu (skanu) OCT, czy też ze strukturą obrazowanych warstw.

Ostatni, piąty rozdział rozprawy poświęcony jest zastosowaniom opracowanych procedur. W szczególności Autorka wprowadza szereg parametrów opisujących własności siatkówki, a szczególnie jej grubość. Bazują one na procedurach segmentacji siatkówki opisanych w rozdziale 3. Podobnie, wyniki uzyskane w zakresie segmentacji obszaru złącza szkliskowo-plamkowego, umożliwiły wprowadzenie nowatorskich metod obrazowania własności tego obszaru, a w szczególności map odwarstwienia ciała szklistego wraz z ilościową oceną zakresu tej patologii. Na podkreślenie zasługuje opracowanie przez Autorkę oprogramowania demonstrującego w syntetycznej i przyjaznej dla diagnosty formie graficznej uzyskiwane rezultaty. Program ten, dostępny w domenie publicznej pod nazwą, może być istotnym wkładem Autorki w rozwój zastosowania OCT do diagnostyki trakcji szkliskowo-siatkówkowej, a szczególnie jej progresu w długich okresach czasu.

Rozprawa zawiera dwa dodatki: opis wspomnianego powyżej autorskiego programu OCTAnnotate do wizualizacji rezultatów segmentacji oraz informację o współpracy interdyscyplinarnej pomiędzy macierzystą uczelnią Autorki – Politechniką Poznańską oraz Uniwersytetem Medycznym w Poznaniu.

Ten aspekt recenzowanej rozprawy zasługuje na szczególną uwagę: tylko poprzez stałą interakcję z medykami zainteresowanymi wykorzystaniem opracowanych technik można uzyskać rezultaty prawdziwie użyteczne. W Dodatku tym Autorka wymienia 5 wspólnych publikacji i 18 prezentacji konferencyjnych.

Analiza wszystkich publikacji Autorki w bazie Scopus wykazuje 18 pozycji, cytowanych 72 razy (44 bez autocytowań Autorki) z indeksem Hirsha = 4. Najczęściej cytowany jest artykuł „Denoising methods for improving automatic segmentation in OCT images of human eye” Bull. of PAS:TS z roku 2017.

Ocena tekstu rozprawy i sposobu prezentacji rezultatów

Praca zredagowana jest w bardzo przyzwoitym języku angielskim, nie zauważyłem żadnych błędów ortograficznych i gramatycznych. Rozprawa jest zredagowana bardzo starannie i czyta się z przyjemnością. Rysunki i tabele sformatowane są czytelnie i dobrane właściwie. Rozprawa liczy 212 stron i zawiera oprócz wstępu i podsumowania 5 rozdziałów merytorycznych. Zaopatrzona jest też w streszczenie w językach polskim i angielskim. Ponadto, dla wygody czytelnika zawiera listę skrótów (być może nieco nadużywanych w tekście, zgodnie z manierą właściwą publikacjom medycznym), listę 117 ilustracji oraz 45 tablic. Zwraca uwagę bardzo starannie przygotowany przegląd literatury przedmiotu – bibliografia liczy 283 pozycje. Co więcej, wymienione w bibliografii artykuły są rzeczywiście wykorzystywane w treści rozprawy – z pewnością nie było intencją Autorki etapowanie ilością pozycji.

Nie natrafiłem na istne usterki tekstu. Niemniej pragnę zwrócić uwagę na zawartość ilustracji w Dodatku 2, zawierającym opis programu OCTAnnotate. W przykładach prezentowanych na Fig. A2.1, A2.2, A2.10, A2.15 pojawiają się niezrandomizowane nazwiska pacjentów. Nawet jeżeli Autorka uzyskała ich zgodę, nie jest to dobra praktyka i nie robi to dobrego wrażenia. W przyszłości, publikując opis programu i przykłady zastosowania, należałoby albo „rozpikselować” dane osobowe albo zastąpić je losowymi ciągami znaków. Oczywiście nie jest to funkcjonalność potrzebna w programie, dotyczy wyłącznie szczególnego przypadku jego prezentacji i nie może mieć wpływu na jego wysoką ocenę. Ponadto komentarz do wzoru (2.2) – marginalnego z punktu widzenia treści rozprawy – budzi wątpliwości. $\Gamma(\tau)$ jest po prostu funkcją koherencji źródła (transformatą Fouriera jego widma).

Podsumowanie

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Agnieszki Stankiewicz stanowi istotny wkład do metod analizy obrazów OCT dla celów diagnostyki medycznej. Autorka sformułowała poprawnie problem naukowy i przedstawiła jego oryginalne rozwiązanie z wykorzystaniem nowoczesnych metod analizy obrazu. Wykazała się również ogólną wiedzą teoretyczną w tematyce będącej tematem rozprawy.

Stwierdzam, że oceniana rozprawa w stopniu wybitnym spełnia wymagania Ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2014.1852 j.t) stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Poznańskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Ponadto wnoszę o wyróżnienie Autorki z uwagi na zarówno badawcze jak i aplikacyjne walory pracy.