



PRZEWODNICZĄCY RADY DISCYPLINY  
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika

*Szeląg*  
prof. dr hab. inż. Wojciech Szeląg

prof. dr hab. inż. Andrzej Materka  
Politechnika Łódzka  
Instytut Elektroniki

Łódź, 27 czerwca 2022 r.

### Recenzja rozprawy doktorskiej

opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika  
i Elektrotechnika Politechniki Poznańskiej

Tytuł rozprawy: Automatic parameterization of human retina image  
Autor rozprawy: mgr inż. Agnieszka Stankiewicz  
Promotor: prof. dr hab. inż. Adam Dąbrowski  
Promotor pomocniczy: dr inż. Tomasz Marciniak  
Dyscyplina: automatyka i robotyka

Przedmiotem pracy jest poszukiwanie skutecznych metod automatycznego przetwarzania i parametryzacji obrazów optycznej tomografii koherencyjnej (*ang. optical coherence tomography, OCT*) siatkówki oka ludzkiego. Przeznaczeniem komputerowej analizy obrazów z użyciem tych metod jest wspomaganie rozpoznania i leczenia schorzeń oka. Informacje wydobyte z obrazów za ich pomocą mogą pomóc w zredukowaniu wpływu czynników subiektywnych w diagnozie medycznej i zwiększeniu jej trafności. Rozpatrywane schorzenia objawiają się zmianami w strukturze geometrycznej obszaru przejściowego między siatkówką a ciałem szklanym i zmianami w siatkówce. Estymacja parametrów geometrycznych tej struktury jest w ujęciu Autorki poprzedzona wydzieleniem obszarów obrazu reprezentujących struktury anatomiczne istotne w ocenie stanu oka, czyli segmentacją. Ważnym założeniem jest występowanie zakłóceń losowych i innych nieidealności, które mają wpływ na dokładność segmentacji. Redukcja wpływu tych czynników lub ich eliminacja zostały w związku z tym uznane za niezbędny etap przetwarzania obrazu, poprzedzający segmentację. We wprowadzeniu Autorka zwięźle charakteryzuje istniejące metody automatycznej analizy obrazów siatkówki i ich niedoskonałości.

Cele i tezę rozprawy przedstawiono w rozdziale 1.4 na str. 7. Autorka twierdzi, że dokładną segmentację obrazu 3D OCT i parametryzację odwzorowanych w nim zmian chorobowych można uzyskać za pomocą właściwego doboru metod poprawy jakości obrazu, precyzyjnych algorytmów segmentacji obszaru przedsiatkówkowego oraz technik automatycznej parametryzacji interfejsu szklankowo-siatkówkowego.

Problem naukowy oraz praktyczne korzyści jego pomyślnego rozwiązania zostały jasno przedstawione w rozdziale 1. Nie ma wątpliwości, że projekt doktorski został ukierunkowany na rozwiązanie istotnego problemu naukowego, mające znaczenie praktyczne w ochronie zdrowia i badaniach naukowych w dziedzinie medycyny. Celem tego projektu jest twórcze

udoskonalenie dobrze sprawdzonego schematu automatycznej analizy obrazów siatkówki przedstawionego na str. 5. Teza rozprawy jest sformułowana klarownie, choć przypuszczam że termin „precise [...] algorithms” ma charakter potoczny. Przeciwnieństwo takich, algorytmy nieprecyzyjne, byłyby po prostu błędne. Być może zamierzeniem było odwołanie do algorytmów dokładnej (i także precyzyjnej) segmentacji obrazów.

Praca ma charakter teoretyczno-doświadczalny. Obejmuje wprowadzenie, krytyczny przegląd stanu wiedzy, sformułowanie hipotez dotyczących możliwości udoskonalenia istniejących metod analizy obrazów OCT siatkówki, propozycję własnych rozwiązań, opracowanie stosownych algorytmów i programów komputerowych, zaplanowanie i przeprowadzenie eksperymentów, analizę i dyskusję wyników. Projekt został zrealizowany we współpracy z lekarzami – okulistami z Uniwersytetu Medycznego (UM) w Poznaniu. Opracowane rozwiązania zostały przetestowane z wykorzystaniem bazy obrazów OCT. Autorka zaprojektowała interfejs użytkownika wyspecjalizowanego programu komputerowego *OCTAnnotate*, w którym zaimplementowano opracowane przez nią metody analizy oraz schematy wizualizacji wyników, usprawniające pracę medyków. Treść rozprawy podzielono na 6 rozdziałów, logicznie odpowiadających kolejnym etapom przeprowadzonych badań, wykaz literatury, a także spisy rysunków i tabel, wykaz skrótów oraz dwa dodatki.

Wprowadzenie do tematyki rozprawy i analiza stanu wiedzy zostały opracowane na podstawie literatury, głównie publikacji anglojęzycznych ostatnich dziesięcioleci. Całkowita liczba cytowanych źródeł jest znaczna – wynosi 283. Autorka ze swobodą i wnikliwością korzysta z zawartych w nich informacji. Przegląd literatury jest krytyczny i szczegółowy, zarówno w zakresie podstaw teoretycznych jak i efektów automatycznej analizy obrazów znanymi metodami. Dobór źródeł oraz przeprowadzona przez mgr Stankiewicz dyskusja ich zawartości świadczą o tym, że posiada ona wiedzę niezbędną do prowadzenia badań naukowych mieszczących się w zakresie dyscypliny automatyka i robotyka, a także pokrewnej dyscypliny inżynieria biomedyczna.

W celu udowodnienia słuszności tez zaplanowano eksperymenty i przeprowadzono analizę wyników komputerowego przetwarzania cyfrowych obrazów OCT. W rezultacie współpracy z zespołem UM w Poznaniu Autorka zbudowała bazę danych – obrazów OCT zarejestrowanych dla 46 pacjentów kliniki z rozpoznaniem tzw. trakcji szklisto-plamkowej (*ang. vitreomacular traction, VMT*) oraz 66 ochotników zdrowych. Stan oczu wybranych pacjentów był monitorowany przez 4 lata. Po wstępnej analizie wydzielono trzy liczne zbiory obrazów – dla osób zdrowych, z rozpoznaniem VMT i VMA (*ang. vitreomacular adhesion*). Trzech okulistów dokonało manualnej segmentacji wybranych obrazów korzystając z autorskiego programu *OCTAnnotate*. Wyniki tej segmentacji pozwoliły zdefiniować zbiór odniesienia, do porównań z wynikami analizy automatycznej za pomocą opracowanych metod.

Rozwinięcie metod i narzędzi analizy obrazów OCT w rozdziale 2 zawiera informacje o budowie oka, technice optycznej tomografii koherencyjnej i własnościach obrazów OCT, a także charakterystykę znanych metod segmentacji takich obrazów. Kolejne dwa rozdziały to drobiazgowo, wnikliwie studia metod redukcji zakłóceń szumowych oraz segmentacji

z wykorzystaniem głębokiego uczenia jako skutecznej alternatywy dla metody znajdowania najkrótszej ścieżki w grafie obrazu. Autorka bada dokładność licznych wariantów rozpatrywanych metod oraz poszukuje sposobów ich uodpornienia na pozostałości zakłóceń oraz lokalne zmiany kontrastu obrazu. Rozdział 5 to opis wysoce kompetentnego wykorzystania opracowanych metod do budowy narzędzia wspomagającego proces badania stanu oka potrzebny do rozpoznania VMT/VMA. Oryginalne propozycje parametrów charakteryzujących strukturę siatkówki zostały szczegółowo uzasadnione, a ich skuteczność udokumentowana wynikami analizy statystycznej oraz przekonującymi barwnymi wykresami.

Przeprowadzony dowód słuszności hipotezy naukowej jest obszerny, drobiazgowy i przemyślany. Wybór metod przetwarzania obrazów dla osiągnięcia celu projektu doktorskiego jest właściwy. Przyjęte założenia zostały w rozprawie uzasadnione. Praca zawiera ilościową ocenę dokładności i skuteczności proponowanych algorytmów automatycznej analizy obrazów OCT w porównaniu do metod referencyjnych. Zastosowane metody badawcze są odpowiednie w odniesieniu do podjętego zagadnienia naukowego. Przebieg licznych eksperymentów szczegółowo opisano, a wyniki zestawiono w tabelach i na wykresach.

Częściowe wyniki pracy badawczej mgr Stankiewicz zostały opublikowane w pięciu artykułach na łamach indeksowanych czasopism naukowych. Doktorantka jest pierwszym autorem trzech z nich (w *Sensors*, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, Metrology and Measurement Systems*). Prace te zostały również przedstawione w 18 doniesieniach na międzynarodowych konferencjach.

Struktura rozprawy jest właściwa dla opracowań naukowych. Tekst pracy nie zawiera powtórzeń. Wykresy, rysunki, tabele i wzory są czytelne. Rozprawa została zredagowana starannie i napisana niemal bezbłędnie w języku angielskim. Poniżej zamieszczam moje komentarze dotyczące treści pracy oraz uwagi odnoszące się do niektórych słów i sformułowań niedokładnie odpowiadających sytuacji, w których zostały użyte.

- 1) W nawiązaniu do treści rozprawy jej tytuł jest zbyt ogólny. Opisane badania dotyczą obrazów optycznej tomografii koherencyjnej.
- 2) Strona XI: 2.3.4→2.3.3; 2.3.5→2.3.4
- 3) Strona 2: micron→micrometer
- 4) Strona 19: to calculate the interference spectrum→to measure (acquire?) the interference spectrum.
- 5) Strona 21: Fraza „Hence ... OCT image.” nie jest zdaniem.
- 6) Strona 23: W technice przetwarzania obrazów rozdzielczość jest definiowana w dwóch znaczeniach. Są nimi:

- tzw. rozdzielczość pikselowa (wokselowa) scharakteryzowana liczbą punktów obrazu i wynikająca z odstępów próbkowania rozkładu intensywności zmierzonej lub zrekonstruowanej w polu widzenia kamery, skanera, itd.,

- zdolność rozdzielcza odnosząca się do możliwości rozróżnienia w obrazie obiektów położonych blisko siebie w obrazowanej przestrzeni.

Oba pojęcia są niezależne, choć odstęp próbkowania w urządzeniach obrazujących jest dobierany stosownie do zdolności rozdzielczej. Przy zwykle przyjmowanym założeniu liniowości układu obrazowania, zdolność rozdzielcza jest zdeterminowana jego odpowiedzią impulsową, tzw. funkcją rozmycia punktu (*ang. point-spread function, PSF*). W przypadku optycznej tomografii koherencyjnej funkcja ta jest przybliżana trójwymiarową funkcją Gaussa, o małej wartości parametru  $\sigma_z$  w kierunku osiowym i większych wartościach  $\sigma_x$  oraz  $\sigma_y$  w kierunkach poprzecznych [R1], [R2]. Przyjmuje się umownie że zdolność rozdzielcza w danym kierunku jest równa szerokości profilu PSF w połowie jego wysokości (*ang. full width at half maximum, FWHM*). Jeśli nie jest znana zasada doboru wartości odstepu próbkowania obrazu „analogowego” rozmytego funkcją PSF w danym systemie obrazowania, nie ma podstaw do określenia zdolności rozdzielczej.

W grucie rzeczy dokładna segmentacja warstw siatkówki wymaga dobrej rozdzielczości przestrzennej. Jak wynika z tab. 2.5, odstepy próbkowania („voxel size”) mają różne wartości w dostępnych urządzeniach komercyjnych. Bez dodatkowych informacji, znajomość rozmiarów woksela nie wystarcza do ilościowych porównań wyników segmentacji obrazów zapisanych za pomocą urządzeń OCT różnych producentów.

- 7) Strona 23 i inne: hider→hinder
- 8) Strona 42: Zdanie „A more detailed characterization of deep learning for retina layers segmentation includes Section 2.3.3.” jest przykładem składni wprowadzającej niejednoznaczność. Wynika z niego, że charakterystyka segmentacji zawiera w sobie rozdział 2.3.3. Przypuszczam, że nie taki przekaz nie był intencją Autorki. Tekst rozprawy zawiera kilka tego rodzaju zdań, w których podmiot jest zamieniony z dopełnieniem, np. „The proposed ... Figure 3.6.” na str. 68,
- 9) Strona 47, wzór (2.14):  $(A(x) - M(x)) \rightarrow |A(x) - M(x)|$
- 10) Strona 53: 2.3.4→2.3.3
- 11) Strona 55: 2.3.5→2.3.4
- 12) Strona 63 i dalsze: Skrót „px” jest używany w podwójnym znaczeniu. Piksel (*ang. pixel, picture element*) jest (zwykle) prostokątnym elementem obrazu. Intensywność tego elementu jest stała na całej jego powierzchni. Jest to obiekt dwuwymiarowy. Grubość warstwy jest długością odcinka jednowymiarowego, piksel nie jest miarą tej długości. W dalszej części rozprawy (str. 156) Autorka stosuje wielkość  $w_z$  do oznaczenia długości boku woksela (*ang. voxel, volume element*) w kierunku osiowym. Ten symbol mógłby służyć jako jednostka grubości. Dodatkowo, indeks wskazywałby kierunek pomiaru.
- 13) Strona 102: Co oznacza komentarz „with the same parameters” w podpisie rys. 4.9?

- 14) Strona 105: Jakiego rodzaju operacje przetwarzania obrazów składały się na ich losowe przycinanie („random cropping”)? Czy przycięte obrazy były interpolowane i zostały przepróbkowane?
- 15) Strona 128: The author poses→The author thinks (deems?)
- 16) Strona 132: Znaczenie symboli I, N, S użytych na rys 5.2 nie zostało wyjaśnione.
- 17) Strona 159 rys. 5.25: in red→in yellow(?)

W podsumowaniu chcę podkreślić, że dysertacja doktorska mgr inż. Agnieszki Stankiewicz pozytywnie się wyróżnia na tle innych znanych mi prac. Przeprowadzone i perfekcyjnie opisane przez nią badania cechują się kompleksowością i są w sposób przemyślany ukierunkowane na skuteczne rozwiązanie problemów o dużym znaczeniu praktycznym i społecznym. Badania te zostały opublikowane w znaczących czasopismach naukowych, a tym samym poddano je dyskusji w środowisku międzynarodowych specjalistów. Całość dysertacji ma charakter monograficzny, narracja jest przejrzysta, dzieło ma walory dydaktyczne, czytałem je z dużym zainteresowaniem. Mam nadzieję, że zawarte w mojej recenzji komentarze i uwagi okażą się przydatne w kolejnych badaniach naukowych i publikacjach Autorki.

Magister inżynier Agnieszka Stankiewicz opracowała oryginalne rozwiązanie istotnego problemu naukowego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych. Kandydatka posiada wiedzę teoretyczną i praktyczną potrzebną do prowadzenia badań naukowych w dyscyplinie automatyka i robotyka. Stwierdzam w związku z tym, że oceniana rozprawa doktorska spełnia wymagania Ustawy z 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym... (Dz.U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.).

*Andrzej Materka*

[R1] P. H. Tomlins i inni, Measurement of Three-Dimensional Point-Spread Function in an Optical Coherence Tomography Imaging System, Proc. Of ISPEE Vol. 6847, 68472Q (2008), DOI: 10.1117/12.766576

[R2] A. Agrawal i inni, Characterizing the point spread function of retinal OCT devices with a model eye-based phantom, Biomedical Optics Express, Vol. 3, No. 5, 2012, 1116-1126