



dr hab. Maciej Szkulmowski, prof. UMK

Toruń, 22 marca 2018

maciej.szkulmowski@fizyka.umk.pl

tel.: 56 611 3213

Recenzja rozprawy doktorskiej magistra Wojciecha Krauze pt. „Methods for the Numerical Analysis of Phase Biological Microsamples in Limited-angle Optical Tomography”

Przedstawiona praca doktorska magistra Wojciecha Krauze dotyczy analizy danych w dyfrakcyjnej tomografii optycznej ODT (ang. Optical Diffraction Tomography) w wariacie z ograniczonym zakresem kątów oświetlenia i detekcji (LAODT – limited angle ODT). Przedstawiona jest pełna ścieżka przetwarzania zebranych danych eksperymentalnych prowadząca do uzyskania trójwymiarowego rozkładu współczynnika załamania w próbkach sztucznych i biologicznych. Obrazy tomograficzne uzyskiwane metodą LAODT są z reguły zniekształcone wskutek braku pewnego zakresu częstości przestrzennych wynikającego z ograniczonego zakresu kątów detekcji. Główną tezę stawianą przez autora w rozprawie jest stwierdzenie, że w LAODT możliwe jest uzyskanie obrazów tomograficznych z tymi zniekształceniami znacznie zminimalizowanymi dzięki wykorzystaniu autorskiego algorytmu rekonstrukcji, w którym do standardowej ścieżki przetwarzania dodano krok regularyzacyjny narzucający posiadaną a priori wiedzę o własnościach obiektu tj. o jego ostrych granicach. Przedstawione wyniki symulacyjne i eksperymentalne potwierdzają, że teza stawiana przez autora jest prawdziwa. Dodatkowo autor przedstawia metodę optyczno-numeryczną, która poprzez zastosowanie optyki o zmiennej ogniskowej oraz odpowiednich metod numerycznych, pozwala na złożenie jednego obrazu o zwiększonej jakości z serii obrazów z maksymalną rozdzielczością ustawioną na różnych głębokościach w próbce. W mojej ocenie wyniki uzyskane przez doktoranta stanowią dużą wartość dla społeczności naukowej zajmującej się obrazowaniem biologicznym.

Układ pracy doktorskiej jest czytelny i przejrzysty, zawiera ona 86 stron podzielonych na 6 rozdziałów oraz spis literatury. Praca napisana jest w języku angielskim i poprzedzona streszczeniami w dwóch wersjach językowych (polski i angielski).

Rozdział pierwszy (Introduction) wprowadza czytelnika w tematykę przedstawiając motywację i cel pracy.



Rozdział drugi (State of the art) po krótkim przeglądzie fazowych metod optycznych stosowanych w obrazowaniu próbek biologicznych, skupia się na optycznej tomografii dyfrakcyjnej ODT. W pierwszej kolejności przedstawia ogólną metodologię akwizycji danych i procedur numerycznych prowadzących do trójwymiarowego obrazu obiektu. Następnie w bardziej szczegółowy sposób autor prowadzi czytelnika przez wybrane elementy techniki ODT:

1. Przedstawia najpowszechniejsze realizacje eksperymentalne ODT.
2. Opisuje dwa podstawowe przybliżenia rozwiązania równania Helmholtza umożliwiające rekonstrukcję potencjału rozpraszania obiektu (przybliżenie Born'a i Rytowa).
3. Opisuje sposób wykorzystania zespolonej fazy obliczonej przy użyciu przybliżenia Rytowa oraz twierdzenia o dyfrakcji Fouriera do wyznaczenia trójwymiarowego widma Fouriera potencjału rozpraszania.

W dalszej kolejności opisuje technikę ODT z ograniczonym kątem obserwacji (LAODT) wraz z podstawowymi realizacjami eksperymentalnymi, opisuje artefakty właściwe dla tej metody i ich przyczyny. Następnie zarysowuje dwie rodziny metod minimalizujących te artefakty oraz szerzej opisuje jedną z metod (TpV – total p-variation), która wyjątkowo dobrze radzi sobie z obiektami o fragmentami stałym współczynnikiem załamania. Ta metoda jest podstawą iteracyjnej procedury analizy danych zaproponowanej przez autora i będącej głównym osiągnięciem przedstawionym w dysertacji. Rozdział kończy się opisem narzędzia do ilościowego porównywania jakości obrazów tomograficznych, które jest szeroko wykorzystywane w rozdziałach opisujących wyniki symulacyjne i eksperymentalne.

Autor z dużym wyczuciem wybrał kluczowe aspekty techniki ODT, które umożliwiają zrozumienie dalszych części dysertacji nawet czytelnikowi, który nie jest ekspertem w dziedzinie tej metody obrazowania.

Rozdział trzeci (Total Variation Iterative Constraint Method) w wyczerpujący sposób przedstawia metodę rekonstrukcji tomograficznej zaproponowaną przez autora w ramach rozprawy doktorskiej. Podstawowa nowość metody jest związana z obserwacją, że słabość metody regularyzacji danych TpV, czyli założenie fragmentami stałej wartości współczynnika załamania w próbce, może być przekuta w zaletę, jeżeli wykorzystamy ją jedynie do znalezienia granic obiektu. Autor przedstawia metodologię rekonstrukcji obrazów tomograficznych z wykorzystaniem zaobserwowanego efektu, którą nazywa TVIC – Total Variation Iterative Constraint. Zaproponowana metodologia składa się z dwóch kroków. W pierwszym tworzona jest maska binarna obejmująca jedynie obrazowany obiekt, a w drugim obliczany jest potencjał rozpraszania jedynie w obszarze objętym maską. Uniwersalność tego podejścia umożliwia zastosowanie w drugim kroku dowolnego w zasadzie iteracyjnego podejścia do rekonstrukcji obrazu tomograficznego. W dalszej części pracy autor wybrał algorytm Gerchberga-Papoulisa.



Ciekawym efektem ubocznym zaproponowanego podejścia jest możliwość usunięcia w procesie tworzenia maski wszystkich fragmentów obrazu, które zawierają niechciane elementy (bakterie, nieokreślone cząstki, fragmenty komórek itp.). Autor proponuje dwie strategie czyszczenia obrazu.

W dalszej części rozdziału autor przeprowadza symulacje numeryczne na modelu kulki o stałym współczynniku załamania oraz modelu komórki z jądrem, wakuolą oraz nietrywialnym rozkładem współczynnika załamania w cytoplazmie. W ramach symulacji porównuje jakość rekonstrukcji symulowanych obiektów przy użyciu metody GP oraz TVIC-GP w funkcji liczby użytych projekcji. Określa również optymalną liczbę iteracji algorytmu TVIC-GP w warunkach detekcji sygnału bez szumu oraz z szumem. Ostatni eksperyment numeryczny porównuje dwie opisane wcześniej techniki usuwania niechcianych elementów widocznych na obrazie i wskazuje jedną dającą lepsze wyniki.

Rozdział czwarty (Extended depth-of-field LAODT) przedstawia drugie osiągnięcie autora tj. metodę maksymalizację rozdzielczości w grubszych próbkach biologicznych poprzez złożenie serii obrazów z ostrością zoptymalizowaną na innej grubości w próbce. Autor przedstawia znaczenie problemu spadku rozdzielczości przy wzrastającej odległości od powierzchni sprzężonej z detektorem i proponuje użycie soczewek o zmiennej ogniskowej do przesuwania płaszczyzny sprzężonej w kolejnych pomiarach. Następnie proponuje algorytm łączenia tak zebranych danych.

Rozdział piąty (Physical experiments) przedstawia wyniki eksperymentalnej walidacji metod opisanych w rozdziałach trzecim i czwartym.

W pierwszej części pokazane są wyniki uzyskane za pomocą metody TVIC-GP. Eksperyment z wykorzystaniem mikrokulek ze szkła akrylowego o znanym współczynniku załamania pokazuje, że metoda zaproponowana przez autora lepiej radzi sobie z rekonstrukcją kształtu obiektu niż metoda bez regularyzacji. Efekt jest szczególnie widoczny w kierunku pionowym, w którym metoda LAODT ma największe braki w widmie częstości przestrzennych. Kolejnym krokiem było zastosowanie algorytmu do rekonstrukcji obrazu pojedynczej komórki – fibroblastu. Również w tym przypadku rekonstrukcja obrazu ma największą jakość w porównaniu do pozostałych metod rekonstrukcji.

W drugiej części autor pokazuje wyniki eksperymentów z łączeniem serii obrazów zogniskowanych na różnych głębokościach. Podobnie jak w poprzedniej części metoda walidowana jest na kulkach ze szkła akrylowego, a następnie zastosowana do zobrazowania pojedynczych komórek oraz fragmentu nowotworowo zmienionej prostaty. Również w tym przypadku jakość otrzymanych obrazów wzrosła po zastosowaniu proponowanej metody.

Rozdział szósty (conclusions and future trends) podsumowuje pracę i nakreśla dalsze kierunki badań planowane przez autora.



Praca napisana jest w sposób bardzo czytelny, czyta się ją płynnie. Doktorant sprawnie porusza się po całości tematyki dotyczącej tomografii optycznej ODT, mimo że bezpośrednio nie uczestniczył we wszystkich pracach niezbędnych do uzyskania zaprezentowanych wyników - nie konstruował na przykład urządzeń pomiarowych. Jednak specyfika pracy we współczesnych zespołach naukowych w zupełności tłumaczy i usprawiedliwia taki stan rzeczy.

Wyniki otrzymane przez doktoranta zostały zaprezentowane w sześciu artykułach z listy JCR, jednym spoza tej listy oraz sześciu materiałach konferencyjnych (cytowanych łącznie 47 razy). W połowie tych artykułów doktorant był pierwszym autorem. Praca z Optics Express zawierająca wyniki zaprezentowane w tej dysertacji została w ciągu dwóch lat od publikacji zacytowana 12 razy. Pokazuje to, że rezultaty uzyskane przez doktoranta zaczynają rezonować w świecie naukowym.

Pomimo wysokiego poziomu prowadzonych badań autor nie ustrzegł się od drobnych usterek w prezentacji uzyskanych wyników:

1. Konsekwentny brak znaków interpunkcyjnych po wzorach matematycznych pisanych w osobnych liniach.
2. Str. 17. Figura 2.2.b Soczewki L1 i L2 są niepoprawnie ustawione względem wiązek.
3. Str. 31. Opis metody TpV powinien być umieszczony jako osobny podrozdział – jest to metoda będąca kluczową częścią głównej metody opisanej w doktoracie.
4. Str. 46 i kolejne. Parametr jakości obrazu Q jest zdefiniowany na str. 30 i przyjmuje wartości z zakresu $[-1,1]$, natomiast konsekwentnie jego wartość podawana jest w zapisie procentowym.
5. Str. 49. Brak jakiegokolwiek dyskusji nad przyczynami pogarszania się jakości rekonstrukcji po pewnej liczbie iteracji w algorytmie GP i TVIC-GP.
6. Str. 50. Zdanie „(...) it is not possible to create noisy phase and amplitude sonograms which would be a realistic input to the TVIC-GP method” wydaje się zbyt kategoryczne.
7. Str. 50. Brak dyskusji o wybranych poziomach szumu. Wartości 6dB, 8.8dB 18dB nie są w żaden sposób uzasadnione, ani nie jest podana ich relacja do rzeczywistych wartości szumu w eksperymentach fizycznych.
8. Str. 54. Figura 3.15. Brakuje obrazu rygnalnego obiektu do porównania jakości rekonstrukcji.



9. Str.56. Figura 3.18 i 3.19 ilustrują dwie metody czyszczenia obrazu, ale ich panele a i b pokazują inny typ danych, co utrudnia interpretację i porównanie wyników. Dodatkowo dane wejściowe dla jednej metody mają widoczne dwa zanieczyszczenia, a dla drugiej trzy.
10. Str. 69. Figura 5.3. Na obu panelach brakuje wykresu błędu rekonstrukcji dla metody GP.

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska prezentuje wysoki poziom naukowy i świadczy o dużych umiejętnościach i dojrzałości naukowej doktoranta. Stwierdzam, że spełnia ona wszystkie warunki określone w art. 13 ust. 1 "Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2016 r. poz. 882, 1311.)" i wnioskuję do Rady Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Jednocześnie wnioskuję o uznanie rozprawy doktorskiej za wyróżniającą.

Maciej Szkulmowski