Instytut Chemii Fizycznej Polskiej Akademii Nauk

Zakład Chemii Fizycznej Układów Biologicznych

Kasprzaka 44/52, PL-01 224 Warsaw, Poland

Tel. +(48 22) 343 3283
+(48 22) 343 20 00
Fax +(48 22) 343 33 33
+(48 22) 632 52 76
E-mail: ichf@ichf.edu.pl

Prof. dr hab. Maciej Wojtkowski
Physical Optics and Biophotonics Group
Email: mwojtkowski@ichf.edu.pl

1 września 2024

Opinia o pracy doktorskiej pana magister inżyniera Mikołaja Rogalskiego

Opiniowana praca doktorska pana magistra inżyniera Mikołaja Rogalskiego zatytułowana „Optonumeryczny rozwój technik ilościowej mikroskopii fazowej" została wykonana pod promotorską opieką panów profesorów Macieja Trusiaka oraz Michała Jóźwika w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Na rozprawę doktorską składa się dziewięć spójnych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w pismach recenzowanych o tytułach dobrze rozpoznawalnych globalnie przez ekspertów w dziedzinie zastosowań optyki, oraz dwóch artykułów opublikowanych w zeszytach konferencyjnych, które mają status pełnoprawnych publikacji z częściowym recenzowaniem artykułów naukowych. W pięciu artykułach praz dwóch publikacji w zeszytach konferencyjnych pan Rogalski jest pierwszym autorem, natomiast w pozostałych czterech wykazał on swój udział procentowy i zasadniczy wkład merytoryczny.

Wszystkie prace będące przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej są wysokiej jakości o znaczącym stopniu wpływu na środowisko zajmujące się ilościowymi metodami mikroskopii oraz wyraźnej oryginalności proponowanych rozwiązań. Prace oryginalne opatrzone są „przewodnikiem" w języku polskim oraz dwujęzycznym streszczeniem. Przedstawione publikacje powstały w okresie ostatnich czterech lat. W odrębnych tabelach przedstawiono szczegółowo wkład autora do wieloautorskich publikacji poprzez określenie procentowe udziału w opisanych w nich pracach badawczych.

Główną tematyką w rozprawie doktorskiej Pana magistra inżyniera Mikołaja Rogalskiego jest rozwój metod ilościowej analizy danych w mikroskopii. Stąd praca ma głównie charakter obliczeniowy z elementami eksperymentalnymi i skupieniem uwagi na algorytmice analizy danych dla metod mikroskopii interferencyjnej i holograficznej oraz mikroskopii ptychograficznej. Poruszane zagadnienia badawcze obejmują zakres zastosowań optyki współczesnej, optyki fizycznej, inżynierii optycznej, informatyki stosowanej i ich zastosowań w wielu gałęziach techniki, medycyny i biologii. W swoich działaniach pan Mikołaj umiejętnie łączy aspekt rozszerzenia wiedzy z dziedziny optyki fizycznej z rozwojem algorytmiki. Autor tak w przewodniku jak i w załączanych prezentacjach wskazuje aktualny stan wiedzy na bazie literatury światowej. Analizę źródeł przedstawioną w przewodniku i publikacjach dokonano baz zarzutu. Autor w sposób przejrzysty i syntetyczny wprowadza metody, które rozwija oraz wskazuje na konkretne działania w takcie swojego projektu, które zakończyły się publikacjami naukowymi.

Tematyka pracy, którą zajmował się pan Rogalski ma znaczenie praktyczne. Odbiorcami nowych zoptymalizowanych metod mogą być tak grupy badacze zajmujące dalszym rozwojem i optymalizacją obrazowania ilościowego jak również przedsiębiorcy zajmujący się wdrażaniem nowych technologii lub wykorzystywaniem metod obrazowania obliczeniowego.

Głównymi wyzwaniami współczesnych technik mikroskopowych jest niskokosztowa implementacja metod ilościowych oraz metod syntezy aperturowej pozwalającej wyjść poza ograniczenie dyfrakcyjne. Techniki takie jak mikroskopia holograficzna czy ptychograficzna stanowią interesującą alternatywę dla technik superrozdzielczych, które mogą być zaimplementowane niskim nakładem finansowym. Jednak uzyskanie przekonujących wyników ilościowych, powtarzalności, stabilności i dużej szybkości obliczeniowej wymaga wprowadzenia nowych nieortodoksyjnych sposobów analizy danych. Temu zagadnieniu poświęcona jest praca pana Mikołaja Rogalskiego.

W krótkim doniesieniu P1 autor opisał autorską aplikację FFPMap służącą do rekosntrukcji obrazowych danych z mikroskopii ptychograficznej. W tej aplikacji pan Rogalski zaproponował automatyczną metodę przetwarzania danych wejściowych bez konieczności interwencji manualnej użytkownika – upraszczając w ten sposób użytkowanie mikroskopu. Dodatkowo autor wyposażył swoją aplikację w moduł symulacyjny pozwalający zaplanować eksperyment i zrozumieć lepiej ograniczenia techniczne metody. Autor wprowadził również autorską i czasowo wydajną metodę korygowania błędów ustawienia kątów oświetlenia. Wynikowe kody aplikacji są dostępne na GitHub. W przypadku metod mikroskopii interferencyjnej pan Rogalski zajmował się metodami skutecznego usuwania tła i odszumiania sygnałów prążków, które umożliwiają uzyskanie reprezentacji zespolonej cyfrowego sygnału prążkowego. Takie sygnały następnie mogą być użyte do uzyskania rekonstrukcji fazowych za pomocą Transformacji Hilberta. Ze względu na dużą zmienność sygnałów interferometrycznych rekonstrukcja zespolonej reprezentacji sygnałów jest zadaniem nietrywialnym i podatnym na błędy systematyczne. W pracach P2 oraz K2 autor pokazał zastosowanie istniejącego algorytmu iteracyjnego odszumiania obrazów do obrazów prążkowych. Doktorant wskazał, że nowe podejście wykazuje się lepszymi parametrami filtracji dla obrazów o wysokim poziomie szumu. W kolejnej publikacji pan Rogalski ze współautorami zaproponowali wykorzystali sprzętowe rozwiązanie usuwania szumów koherentnych używając interferometrii światła częściowo spójnego. Choć metody te są dobrze znane i implementowane to aspektem nowości było przeanalizowanie wpływu wprowadzonej niespójności światła na efektywność działania algorytmu opartego na transformacji Hilberta. Pan Rogalski również wspomagał prace pani dr Marii Cywińskiej w zastosowaniu konwolucyjnych sieci neuronowych do wyznaczania map orientacji prążków oraz lokalnej mapy gęstości prążków. Obie te operacje są trudne do wykonania w formie analitycznej ze względu na komplikację sygnałów interferometrycznych w realnych pomiarach oraz ze względu na możliwe zmiany konfiguracji pomiarowej wprowadzane przez sam badany obiekt (np. w przypadku próbek biologicznych). Jednak nasza percepcja umożliwia dość łatwą intuicyjną interpretację orientacji prążków i ich gęstości. Wskazuje to na możliwość zastosowania uczenia maszynowego w tym celu. Skuteczne działanie metod zaproponowanych prze doktoranta i współpracowników dla złożonych wzorców zostało potwierdzone w prezentowanej publikacji P4.

Najliczniejszą i najistotniejszą częścią pracy pana Rogalskiego było rozwijanie algorytmów pozwalających uzyskiwać informację fazową z sygnałów poosiowej mikroskopii holograficznej. W tej technice z definicji informacja fazowa jest zakodowana w dwóch sprzężonych sygnałach odpowiadających rzeczywistemu mierzonemu obrazowi. Odkodowanie tej informacji jest możliwe przy wielokrotnych pomiarach ze zmianą płaszczyzn głównych i stałych propagacji w algorytmach rekonstrukcyjnych. Jest to jednak metoda iteracyjna i nieanalityczna – między innymi może ona wykorzystywać algorytm Gerchbegera-Saxtona (G-S). W pracy P7 pan Rogalski zaproponował ulepszony algorytm GS z dodatkową filtracją pola zespolonego pozwalający na szybszą zbieżność dzięki obserwacji, że niskie częstości spowalniają ten proces. Kolejnym krokiem w doskonaleniu metody rekonstrukcyjnej poosiowej mikroskopii holograficznej było zastosowanie autorskiej nadzorowanej sieci neuronowej uczonej na danych syntetycznych stworzonych w oparciu o dogłębną znajomość procesu fizycznego (P8). Innym sposobem minimalizacji wpływu obrazów sprzężonych jest rozwiązanie sprzętowe z zastosowaniem dodatkowego oświetlenia falą sferyczną i uzyskanie nie osiowego obrazu prążków. W ten sposób wykorzystując prosty układ dzielnika światłowodowego i końcówek dwóch włókien jako źródeł światła pokazano w pracy P9 możliwość rekonstrukcji fazowej z jakością porównywalną do tej, którą uzyskuje się bez obrazu sprzężonego. Ponadto autor również rozwinął algorytm do śledzenia mikroskopowych obiektów mierzonych za pomocą mikroskopii holograficznej w przestrzeni i czasie. Metoda ta została zademonstrowana w sposób bardzo spektakularny na wynikach oceny ruchliwości plemników.

Przyjęta przez autora metodyka badań nie budzi zastrzeżeń we wszystkich przedstawionych pracach. Jakość publikacji jest na bardzo wysokim poziomie, porównywalna do prac publikowanych przez grupy badawcze z najlepszych ośrodków badawczych, które są aktywne w tej dziedzinie. Zaproponowana tematyka i sposób rozwiązania problemów celuje w samo sedno rozwoju metod obliczeniowych w metodach mikroskopii ilościowej, obrazowaniu ptychograficznym i interferometrycznym.

W przedstawionych pracach zaproponowano szereg oryginalnych rozwiązań adaptacyjnych metod analizy danych pomiarowych i algorytmów rekonstrukcyjnych, z których na szczególną uwagę zasługują metody minimalizacji wpływu obrazów sprzężonych w poosiowej mikroskopii holograficznej z wykorzystaniem rozwiązań algorytmicznych i technik uczenia macierzowego. Ponadto ważne jest, że autor nie ograniczał się jedynie do rozwiązań numerycznych, ale także poszukiwał metod sprzętowych do uzyskania oczekiwanych efektów optymalizacji i poprawy działania mikroskopii holograficznej i interferometrycznej. Wynikiem opisanych w pracy doktorskiej działań są nowe metody analizy sygnałów, które z pewnością znajdą zastosowanie tak w aranżacjach eksperymentalnych jak i w urządzeniach komercyjnych. Zaprezentowane publikacje napisane są przejrzyście, językiem angielskim na bardzo dobrym poziomie. Prace te czyta się bez trudności. Nie mam zastrzeżeń do strony edytorskiej i zawartości merytorycznej wszystkich publikacji. Autor wykazał umiejętności przedstawiania celu pracy i uzyskanych wyników. Przewodnik jest również napisany czytelnie i syntetycznie.

Jedyna drobna uwaga dotyczy układu samego przewodnika i pracy doktorskiej. Uważam, że byłoby cenniejsze ułożenie treści według autorskiego zaangażowania i znaczenia prac podkreślając w pierwszej kolejności prace związane z poosiową mikroskopią holograficzną. W ten sposób autor mógłby lepiej zogniskować uwagę czytelnika i zdefiniować bardziej czytelnie problem badawczy jakiego podjął się w swoim projekcie.

<u>Szczegółowe i mniej istotne komentarze dotyczące przewodnika:</u>

- Częściowo koherentne źródła światła – bardziej rygorystycznie w języku polskim używa się pojęcia częściowej spójności światła .
- Interpolacja splajnowa – po polsku nazywa się interpolacją funkcjami sklejanymi.
- Wzór 11i 14 – czy powinno być 1/tan czy arctan – taki zapis jest mylący – w literaturze polskiej dominuje raczej arctan.

Podsumowując stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr inż. Mikołaja Rogalskiego w pełni spełnia warunki stawiane pracom doktorskim przez ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony oraz wyróżnienie pracy za wprowadzenie nowych, uniwersalnych metod minimalizacji wpływu obrazów sprzężonych w poosiowej mikroskopii holograficznej otwierając nowe możliwości wykorzystania tej techniki.

Z poważaniem,

Maj Wojtkowski