

prof. dr hab. Jan Masajada
Katedra Optyki i Fotoniki
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

Wrocław 19.09.2025

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej
mgr inż. Moncy Sajeev Idicula

Wide angle holography with phase only spatial light modulator (SLM)

W przedstawionej do recenzji rozprawie opisane zostały wyniki badań mających na celu poprawienie parametrów szerokokątnej holografii cyfrowej.

Rozprawa bazuje na dziesięciu publikacjach w czasopismach z listy JCR jednej publikacji w recenzji (nie podano nazwy czasopisma) i sześciu komunikatach konferencyjnych. W jednej z publikacji doktorant jest pierwszym autorem. Wyniki badań doktorant przedstawił na trzech konferencjach w postaci referatu a na pozostałych trzech w postaci plakatu. Czasopisma, w których publikował doktorant należą do najlepszych z zakresu optyki. Tabela (2.4) zawiera opis wkładu autora do każdej z wymienionych publikacji. Wynika z niej, że autor zajmował się głównie budową układów doświadczalnych, ich uruchomieniem i przetestowaniem, oraz przeprowadzeniem eksperymentów i opracowaniem ich wyników. W części prac wymieniony jest również jego wkład w rozwój metody i oprogramowania. Liczba i jakość zaprezentowanych w ramach rozprawy artykułów przekracza zwyczajową przyjętą normę dla dobrych rozpraw doktorskich, to jest czterech, pięciu prac opublikowanych w dobrych czasopismach.

Tematyka podjęta w ramach rozprawy związana jest z istotnymi na chwilę obecną problemami z zakresu optyki. Rozwój mikroskopii holograficznej i wyświetlaczy holograficznych ma znaczenie i badawcze i praktyczne. W mojej ocenie wyniki osiągnięte przez doktoranta i jego zespół mają szansę odcisnąć swój ślad na rynkowych rozwiązaniach związanych z rozwojem wyświetlaczy holograficznych. Wyniki osiągnięte przez doktoranta oceniam wysoko.

Praca dzieli się na dwie części. Pierwsza z nich związana jest z rozwojem mikroskopii holograficznej a druga z rozwojem wyświetlaczy ciekłokrystalicznych. Wspólnym mianownikiem jest wykorzystanie fazowego

ciekłokrystalicznego przestrzennego modulatora światła. Przejdę teraz do szczegółowej oceny pracy.

Szczegółowa ocena rozprawy

Pierwsza część rozprawy poświęcona cyfrowej mikroskopii holograficznej (DHM) zastosowanej jako profilometr. W założeniu profilometr ma zwiększyć możliwość badania topografii powierzchni zawierających głębsze uskoki i strome zagłębienia. Autorzy zaproponowali rozwiązanie polegające na oświetleniu próbki z siedmiu różnych kierunków, przy rejestracji pojedynczego obrazu. W drugim rozwiązaniu zaproponowali użycie do oświetlania fali sferycznej. Zgodnie z tabelą 2.4 wkład autora obejmował prace nad rozwojem koncepcji, budowę i uruchomienie układu pomiarowego oraz przeprowadzenie i opracowanie eksperymentów. Na podstawie wyników zamieszczonych w rozprawie mogę stwierdzić, że cele nakreślone w tezach pracy zostały osiągnięte. Poniżej odnoszę się do poszczególnych etapów prac nad profilometrem, przedstawionych w rozprawie.

Holograficzny profilometr pojedynczej ekspozycji, który wykorzystuje oświetlenie próbki z siedmiu różnych kierunków został zaprezentowany w pracy [P1]. Oświetlenie jest generowane przez SLM. Opracowana została procedura doboru oświetlenia próbki i demodulacji uzyskanych obrazów. Rozwiązanie pozwala na charakteryzację powierzchni zawierającej elementy o dużej głębokości do 25mkm, z wysoką rozdzielczością osiową. Profilometr przeszedł pomyślnie testy na wybranych próbkach.

Praca MIDHP w przypadku obiektów o zmiennym nachyleniu ścianek wymaga precyzyjnego dopasowania fazy wiązek skanujących. Od strony technicznej oznacza to konieczność dokładnego określenia położenia ogniska dla każdej z tych wiązek. Odpowiedni algorytm automatycznego określania położenia ognisk został opracowany w grupie doktoranta. Charakteryzuje się on dużą dokładnością oraz szybkością obliczeniową. Doktorant zbudował układ do jego przetestowania mikroskopu. Zaimplementowany algorytm przeszedł pomyślnie testy [P4, C1].

Do pomiaru obiektów o dużej aperturze numerycznej zaproponowane zostało oświetlenie z zastosowaniem fali sferycznej. Dla osiągnięcia założonej skuteczności opracowana została metoda doboru promienia krzywizny fali sferycznej w zależności od krzywizny obiektu. Opracowano również nową metodę rekonstrukcji opartej o przestrzenną korekcję aberracji. Metoda ta bazuje na analizie numerycznej propagacji fali wchodzącej i odbitej od przedmiotu. Dynamiczna generacja fal sferycznych i płaskich zrealizowana została z użyciem ciekłokrystalicznego przestrzennego modulatora światła. Zaproponowane rozwiązania zostały z powodzeniem sprawdzone na testowych próbkach. Wyniki porównano z pomiarami z użyciem fali płaskiej oraz z profilometrem optycznym (white light interferometer) wykazując większą

dokładność pomiaru z użyciem nowej metody. Metodzie tej poświęcona jest praca [P7]. Zwraca uwagę szeroki zakres prac wykonanych tutaj przez autora, który obejmuje rozwój metody, budowę i uruchomienie układu, prace nad oprogramowaniem, prace rozwojowe nad objętościową metodą kompensacji aberracji.

Powyższe prace dotyczące profilometru holograficznego zostały opublikowane w wysoko punktowanych czasopismach. Wkład pracy doktoranta i uzyskane wyniki spełniają oczekiwania związane z nadaniem tytułu doktora inżynierijsko-technicznych. Brakuje mi jednak ogólnego podsumowania przeprowadzonych prac. Testy prowadzone były na próbkach o regularnym kształcie. Na ile zróżnicowana może być topografia obiektu, by zaprezentowane metody pozwalały na uzyskanie sensownych wyników. Czy można podać przykład w miarę prostego obiektu (ale nie tak regularnego jak w testach), w przypadku którego uzyskane odwzorowanie nie spełnia oczekiwań.

Jak wypada zaproponowany profilometr optyczny na tle komercyjnie dostępnych profilometrów światła białego. Zdaję sobie sprawę, że na poziomie badań trudno jest rywalizować z urządzeniami, które od lat są obecne na rynku. Ale proszę pokusić się o określenie przewag i wad potencjalnego przyszłego dopracowanego profilometru holograficznego.

Druga część rozprawy poświęcona jest holograficznym wyświetlaczom projekcji doocznej pracującym z falą sferyczną. Zaprezentowane prace mają na celu rozwiązanie problemów dopasowaniem pola widzenia układu obrazującego do wymogów widzenia przez człowieka. Dopasowanie to osiągnięte zostało przez odpowiedni układ optyczny i modyfikację oprogramowania do generowania hologramów na SLMie. Testowane były dwa układy optyczne, z źrenicą i bez. Problematyka w przypadku obu systemów jest podobna. Poszczególne wyniki opublikowane są w tych samych artykułach. Z tego powodu omówię oba systemy razem, dla każdej z opublikowanych prac. Moja ocena zaproponowanych metod jak i przeprowadzonych testów jest wysoka. Za tą opinią stoją również artykuły w wysoko punktowanych czasopismach. Przejdę teraz do omówienia poszczególnych prac z uwzględnieniem tych ich aspektów, które zostały określone jako wkład autora.

W pierwszej z prezentowanych prac autor [P5] zdecydował się na konfigurację bez formowania źrenicy (non-pupil) ze względu na możliwość zastosowania diod LED jako źródła światła. Zastosowanie źródeł o obniżonej koherencji pozwoliło na znaczne zmniejszenie uciążliwych efektów speklowych. Jak wykazały pomiary rozdzielczość uzyskanych obrazów jest bliska tych, które zostały uzyskane w oświetleniu laserowym. Technika ta wymaga opracowania efektywnych algorytmów obliczania hologramów cyfrowych. Taki algorytm został opracowany. Nie będę tu się nad nim pochylał, gdyż zgodnie z oświadczeniem autora nie jego opracowanie nie było częścią rozprawy. Niemniej efektywność algorytmu została przez autora sprawdzona

eksperymentalnie. Otrzymane przy oświetleniu LED obrazy były mniej obciążone speklami przy rozdzielczości bliskiej rozdzielczości z użyciem lasera.

Następna praca [P6] związana jest z poszerzeniem obszaru widzenia oka (eybox size), z użyciem siatki dyfrakcyjnej. Technika ta znana jest z wcześniej opublikowanych prac. Wkładem autorów jest opracowanie algorytmu kodowania hologramów tak by uniknąć problemów złego wzajemnego dopasowania obrazów z trzech rzędów dyfrakcyjnych siatki harmonicznej. Efektywność proponowanego algorytmu została potwierdzona doświadczalnie w układzie bez formowania źrenicy (non-pupil) wzbogaconym o dodatkowy układ optyczny. Uzyskanie dobrej jakości obrazowania wymagało zaadaptowanie algorytmów usuwania obszarów niewidocznych (occlusion culling) do potrzeb holografii szerokokątnej, której poświęcona jest praca [P2]. W pracy [P2] zadaniem autora było również prowadzenie eksperymentu.

W pracy oznaczonej jako [P8, C4, C2] autor wykonał prace eksperymentalne związane z przetestowaniem metod pozwalających na odtwarzanie hologramów rzeczywistych obiektów w reżimie szerokokątnej holografii HNED. W takiej sytuacji obraz obciążony jest błędami odwzorowania. W celu korekcji odpowiednich hologramów cyfrowych zastosowano układ transformacji afinicznych. Korekcja została z powodzeniem przetestowana w układzie z formowaniem źrenicy (hologram monochromatyczny) i w układzie bez formowania źrenicy (hologram barwny) (budowa układu+testy).

W pracach oznaczonych jako [P10, C5] autor wykonał prace eksperymentalne związane z przetestowaniem nowej metody odtwarzania kolorowych HNED w układzie bez formowania źrenicy. Zaproponowana metoda jest metodą pojedynczej ramki, która bazuje na składaniu w dziedzinie częstości przestrzennych trzech zoptymalizowanych monochromatycznych hologramów odpowiadających za barwy RGB. Pozwala to na lepsze zachowanie jakości obrazowania. Wkład autora wiązał się z budową i przeprowadzeniem testów proponowanej metody. Układ eksperymentalny był bardziej złożony gdyż odwzorowanie barwne wymaga zjustowania trzech laserów RGB, tak aby oświetliły właściwe sobie obszary SLMa a następnie odpowiednio precyzyjnego złożenia tych wiązek.

W pracy [P3] autor zajął się trudnym problemem aktualizacji wyświetlanego hologramu przy zmianie kąta patrzenia na przedmiot. Głównym problemem jest tu ilość potrzebnych obliczeń. Do tej pory znane algorytmy pracowały w reżimie optyki paraksjalnej. Zespół autora z powodzeniem zaproponował skuteczny algorytm dla optyki z szerokim polem widzenia. Doktorant z powodzeniem przetestował go w eksperymencie.

Praca [P9] związana jest ponownie z zwiększeniem efektywności obliczania szerokokątnych hologramów. Zespół doktoranta opracował nową metodę obliczeniową pracującą w dziedzinie częstości przestrzennych. O ile dobrze zrozumiałem metoda korzysta z zalet techniki obliczeniowej macierzy rzadkich. Zadaniem doktoranta było wykonanie testów eksperymentalnych dla nowej metody, co udało się z powodzeniem przeprowadzić.

Praca [P11] może koncentruje się na rozwoju holografii cyfrowej z falą sferyczną i z analizą prowadzoną w przestrzeni fazowej. Uzyskane w eksperymencie wyniki potwierdzają wartość wprowadzonych rozwiązań. W części opisowej materiał dotyczący artykułu [P11] jest potraktowany zbyt wąsko, tak że jako recenzent w zasadzie oceniałem tą część rozprawy praktycznie tylko na podstawie artykułu. Mam wrażenie, że doktorantowi zabrakło już trochę cierpliwości przy opisie tego materiału.

Holografia jest tą dyscypliną, w której koncepcje są stosunkowo proste, ale ich realizacje trudne i ciągnące się przez długie lata. Praktyczne rozwiązania wymagają dopracowania wielu niełatwych technicznych szczegółów. Prace autora dotyczące obrazowania są tego świadectwem. Jest tu dużo nowatorskich rozwiązań opracowanych i przetestowanych w układach doświadczalnych. Brak jest mi jednak dobrego podsumowania całego podjętego wysiłku. Autor mógłby przykładowo napisać, co według niego, spośród wymienionych osiągnięć, może stać się trwałą wartością w przyszłych wyświetlaczach holograficznych.

Drobne błędy w rozprawie

W pracy zauważyłem drobne błędy edytorskie. Nie jest ich wiele i nie obniżają one w istotny sposób jasności prowadzonego przez doktoranta wywodu. Przykładowo we wzorze 7 oznaczenia nie zgadzają się z ich opisem. Brak jest w spisie rozwinięcia kilku skrótów (np. DHM, MAI).

Podsumowanie

Zaprezentowane wyniki są oryginalne i wartościowe i mają znaczenie praktyczne dla wybranych technik holograficznych. Biorąc pod uwagę zaprezentowane wyniki stwierdzam, że doktorant osiągnął założone w pracy cele. A osiągnięte wyniki wyczerpują wymagania do uzyskania stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych.

Praca wymagała od doktoranta bardzo dobrego opanowania techniki eksperymentu z zakresu holografii cyfrowej. Doktorant wykazał się nadto dobrą znajomością teorii leżącej u podstaw prowadzonych badań.

Praca jest napisana zrozumiałym językiem, zawiera nieliczne błędy pisowni. Rysunki są czytelne, literatura jest dobrze dobrana do treści rozprawy.

Konkluzja

Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska, w świetle obowiązującej ustawy o tytule naukowym i stopniach naukowych, spełnia wynikające z tejże ustawy kryteria i może być podstawą do ubiegania się o stopień doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych. Wnoszę o dopuszczenie rozprawy do obrony publicznej.

Jednocześnie biorąc pod uwagę zakres przeprowadzonych prac, oryginalny wkład doktoranta do dyscypliny, potencjalną użyteczność uzyskanych wyników, oraz ich ponad przeciętną reprezentację w artykułach zamieszczonych w wysoko punktowanych czasopismach wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Jan Masajada