

Warszawa 15.09.2025

Prof. dr hab. Maciej Wojtkowski
Kierownik Międzynarodowego Centrum Badań Oka,
Instytut Chemii Fizycznej,
Polska Akademia Nauk
ul. Kasprzaka 44, 01-224 Warszawa

Recenzja pracy doktorskiej pana magistra Moncy Sajeev Idicula

Opiniowana praca doktorska pana magistra Moncy Sajeev Idicula zatytułowana „Wide angle holography with phase only Spatial Light Modulator (SLM)” została wykonana pod promotorską opieką pana Profesora dr hab. Tomasza Kozackiego na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Na rozprawę doktorską składa się jedenaście spójnych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w pismach recenzowanych o tytułach dobrze rozpoznawalnych globalnie przez ekspertów w dziedzinie, cztery artykuły opublikowane w zeszytach konferencyjnych Proceedings SPIE, które mają status pełnoprawnych publikacji z częściowym recenzowaniem artykułów naukowych, oraz dwa doniesienia konferencyjne z renomowanej konferencji Optica Frontiers in Optics odbywającej się corocznie w USA. W czterech z tych publikacji pan Idicula jest pierwszym autorem. Wszystkie prace będące przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej wyróżnia dobra jakość, znaczący stopień wpływu na środowisko naukowców zajmujących się dziedziną holografii cyfrowej oraz znaczący stopień nowości proponowanych rozwiązań. Prace oryginalne opatrzone są „przewodnikiem” w języku angielskim oraz dwujęzycznym streszczeniem.

Przedstawione publikacje powstały w okresie ostatnich czterech lat i mają łączną dwucyfrową liczbę cytowań bez autocytowań, co oznacza, że wyniki prac są dostrzegane i wykorzystywane przez innych naukowców działających w tej dziedzinie. W odrębnych tabelach przedstawiono szczegółowo wkład autora do wieloautorskich publikacji poprzez określenie opisowe udziału w podjętych pracach badawczych.

Rozprawa doktorska Pana magistra inżyniera Moncy Sajeev Idicula ma charakter eksperymentalno — obliczeniowy z głównym skupieniem uwagi na wprowadzeniu nowych metod holograficznego wyświetlania immersyjnego w urządzeniach zlokalizowanych w nieznaczej odległości od oka. W takich systemach występuje znany problem konfliktu wergencji i akomodacji oka prowadzący do dużego dyskomfortu użytkownika systemów rozszerzonej lub wirtualnej rzeczywistości. Poza tym istotna i trudna do realizacji jest optymalizacja innych istotnych parametrów takich jak rozdzielczość, pole widzenia i komfort widzenia definiowany przez rozmiar przestrzeni, w której cała informacja obrazowa może być wprowadzona do oka — tak zwanego „rozmiaru eyebox-a”. Nowoczesna holografia cyfrowa i

technologie wyświetlaczy zbliżonych do oka dają nadzieję na uzyskiwanie pełnej iluzji w obrazach rzeczywistości rozszerzonej, ale większość obecnie stosowanych metod jest ograniczona do konfiguracji o niskim kącie lub umiarkowanej aperturze numerycznej. W szczególności modulatory światła przestrzennego (SLM) są często ograniczone przez rozmiar pikseli i inne czynniki fizyczne, które ograniczają kąt dyfrakcji czy rozmiar pola widzenia - wpływa to na wierność i użyteczność obrazowania holograficznego lub wyświetlania w trybach szerokokątnych lub ultraszerokokątnych. Najnowsze prace, na przykład w zakresie ekspanderów étendue, hologramów Fresnela o zwiększonej aperturze numerycznej lub SLM opartych na meta-powierzchniach, mają na celu przełamanie tych ograniczeń. Przedstawiona praca doktorska powstała właśnie z powodu tej luki: aby przejść od holografii cyfrowej i metod holograficznego wyświetlania blisko oka z ograniczonych silnie kątów widzenia do projekcji szeroko- lub nawet ultra- szerokokątnej. Aby osiągnąć ten główny cel przedstawionej pracy doktorskiej, zastosowano technikę cyfrowej profilometrii holograficznej w odniesieniu do holograficznych wyświetlaczy zbliżonych do oka — kładąc nacisk na optymalizację jakości obrazu, rozdzielczości i pola widzenia.

Cyfrowa profilometria holograficzna (DHP) umożliwia bezkontaktowy pomiar pełnego pola amplitudy i fazy fal optycznych, co czyni ją użytecznym narzędziem do rozwoju systemów holograficznych tak dla działania pod małymi kątami jak i pod szerokim i bardzo szerokim kątem projekcji. W DHP rejestruje się pełne pole optyczne — zarówno amplitudę, jak i fazę — na całej powierzchni lub fali. Oznacza to, że niewielkie odchylenia długości ścieżki optycznej, kształtu powierzchni lub geometrii refrakcyjnej stają się widoczne w szczegółach zarówno w konfiguracjach osiowych, jak i pozaosiowych. Metoda profilometrii holograficznej umożliwia również stosowanie metod profilowania o wysokiej aperturze numerycznej poprzez oświetlanie obiektu sferycznymi lub wielokątowymi kierunkami oświetlenia czoła fali. Profilometria holograficzna pozwala również na uzyskanie informacji zwrotnych, które mają wpływ zarówno na projektowanie sprzętu optycznego, jak i algorytmy generowania hologramów. Pomiary w technice DHP ujawniają, w jaki sposób rozmiar piksela SLM wpływa na ograniczenie dyfrakcyjne pod szerszymi kątami, gdzie występuje winietowanie lub utrata jasności, lub gdzie pole widzenia staje się ograniczone. Dzięki tym informacjom możliwe jest zaprojektowanie wstępnie zniekształconych frontów falowych, optyki adaptacyjnej, oświetlenia pod różnymi kątami. Metoda ta pozwala także na wybór geometrii oświetlenia, która pomaga zachować ostrość, kontrast i jednolitość w całym kącie widzenia. Wreszcie, DHP jest bezkontaktowy, pełnopolowy, często szybki i może być wykonywany bez mechanicznie ruchomych części, dlatego praktyczne jest jego stosowanie w prototypowaniu, kalibracji i strojeniu. Jako taki pomaga przesuwać i weryfikować praktyczne granice.

W pierwszej z zaprezentowanych prac [P1] autor miał swój wkład w numerycznej implementacji strategii rejestracji hologramów pojedynczego ujęcia dla metody Single Shot HP. Metoda ta jest pochodna do MIDHP (Multi-Incidence Digital Holographic Profilometry), która pozwala przezwyciężyć ograniczenia w głębokości pomiaru i rozdzielczości osiowej w DHM, zbierając kilka pól obiektowych pod różnymi kątami i wykrywając maksimum funkcji skanowania wzdłuż osi. W SSHP zaproponowano jednoramkowy pomiar powierzchni o dużej głębokości i rozdzielczości poniżej 1 μm , poprzez jednoczesne oświetlenie obiektu z siedmiu kierunków oraz multiplexing częstotliwościowy z użyciem fazowego SLM. Autor opracował również protokoły dla oświetlenia wielokątowego oraz wykonał numeryczne rekonstrukcje hologramów eksperymentalnych. Wprowadzono autorski algorytm skanowania wzdłużnego pozwalający na sumowania w dziedzinie Fouriera zmniejszając liczbę operacji FFT (transformacja Fouriera), co znacząco przyspieszyło obliczenia [C1]. W pracy [P4] opracowano również autoogniskowanie pozwalające na automatycznie i dokładnie znalezienie właściwego punktu ostrości, nie polegając na ręcznym ustawieniu. W tych działaniach autor opracował kod do szybkiej rekonstrukcji kształtu oraz skonstruował eksperymentalny układ optyczny do wielokierunkowej profilometrii holograficznej, który umożliwił weryfikację nowych idei. Eksperymenty wykonano dla modelowego obiektu z mikrowypukłościami dla rekonstrukcji z błędami ogniskowania i bez błędów ogniskowania. Kolejnym zaadresowanym ograniczeniem metody MIDHP jest zdolność do odzyskiwania hologramów dla obiektów wymagających wykorzystania wysokiej apertury numerycznej. W publikacjach [P7, C3] zaproponowano nową metodę spherical-wave illumination scanning DHP (SWS-DHP), która umożliwia pomiary przy wysokiej NA. Do kluczowych elementów tej metody należy zaliczyć: dedykowany algorytm rekonstruowania kształtu z kompensacją aberracji objętościowych, który propaguje zarówno fale oświetlenia, jak i fale od obiektu z uwzględnieniem aberracji oraz metoda optymalizacji 2F, polegająca na pomiarze ogniskowej obiektu, aby dobrać sferyczny składnik oświetlenia niezbędny do skanowania. Dzięki tym modyfikacjom uzyskano holograficzną rekonstrukcję obiektu o bardzo wysokiej NA (np. $NA \approx 0.84$), co stanowi jeden z głównych wkładów pracy. W tym zadaniu badawczym autor skonstruował układ optyczny, opracował protokół pomiarowy z oświetleniem falą sferyczną, opracował kod do szybkiej rekonstrukcji holograficznej dla pomiarów z wysoką aperturą numeryczną i wprowadził metodę optymalizacji 2F.

Kolejne prace dotyczyły już zastosowania wysokorozdzielczych technik holograficznych do wyświetlaczy działających w bliskiej odległości od oka. W architekturze bezprzesłonnej z LED i SLM zaproponowano wyświetlacz, który dzięki użyciu niekoherentnego oświetlenia redukuje efekt plamkowania i pozwolił osiągnąć wysoką jakość obrazu [P5]. Wprowadzono metody generacji hologramu dla fali sferycznej z analizą przestrzeni fazowej. Eksperymenty

potwierdziły, że LED działa dobrze przy szerokim polu widzenia, przy porównaniach ze światłem laserowym i rekonstrukcji szczegółowych modeli 3-D. Druga część eksperymentu pokazała, że użycie LED z losową fazą pozwala uzyskać wysoką jakość rekonstrukcji dla projektorów do oka. Obraz optyczny został uchwycony kamerą, z możliwością zmiany ostrości, by zobaczyć detale w różnych miejscach. Wyniki potwierdziły, że rekonstruowane fragmenty miały dobrą jakość i szczegółowość. W publikacji [P5] pan magister Idicula skonstruował układ wyświetlacza w konfiguracji bez źrenicy o wymaganym polu widzenia i przeprowadził stosowne eksperymenty z systemami laserowymi i LED w celu porównania uśredniania szumu i przewagi rozdzielczości LED. W pracy [P6] w systemie wyświetlacza bezźrenicznego użyto objętościowej siatki dyfrakcyjnej, by stworzyć poziome repliki hologramów i uzyskać poszerzenie rozmiaru eyeboxu, co w konsekwencji znacznie powiększyło tolerancję na mimowolne ruchy oka. Dodatkowo zastosowano algorytm kodowania hologramu oparty na reprezentacji fazowo-przestrzennej (PSR), który pozwala zachować poprawną rekonstrukcję obrazu dla dowolnego położenia oka w rozszerzonym rozmiarze eyebox-u. Eksperymenty potwierdziły, że obraz pozostawał poprawny zarówno w centrum, jak i między replikami hologramów, przy zachowaniu szerokiego pola widzenia. Również tutaj pan Idicula wniósł wkład w budowę układu wyświetlacza o wymaganym polu widzenia i przeprowadził porównanie rekonstrukcji hologramu metodą klasyczną z nowo opracowaną metodą rozszerzania pola widzenia. Pomimo bogatej literatury dotyczącej holograficznych wyświetlaczy położonych blisko oka, praktyczne wykorzystanie zawartości z szerokokątnej holografii z rzeczywistych obiektów jest wciąż ograniczone. W wyniku tego hologramy nagrywane są w warunkach wąskiego kąta, co ogranicza pole widzenia i może powodować zniekształcenia obrazów. W publikacjach [P8, C4, C2] zaproponowano metodę, która pozwala używać hologramów w szerokokątnych wyświetlaczach. Metoda ta opiera się na transformacjach afinicznych i podejściu fazowo-przestrzennym, co umożliwia skalowanie (zmianę rozmiaru), translację i zmianę pozycji osiowej i bocznej rekonstruowanego obrazu. Również w tym przypadku pan magister Idicula miał wkład w konstrukcji układów wyświetlaczy w konfiguracji bez i ze źrenicą i w przeprowadzeniu stosownych eksperymentów z rekonstrukcją holograficzną. Aby osiągnąć wyświetlanie pełnego koloru w jednej klatce bez pogorszenia jakości, zaproponowano metodę używającą RGB LED i pojedynczego SLM [P10, C5]. W tych eksperymentach kluczowe było innowacyjne rozdzielenie całkowitej przepustowości przestrzennej SLM pomiędzy kanały kolorów, tak by każdy kanał (R, G, B) miał własny zakres częstotliwości przestrzennych, ale bez nadmiernego dzielenia i strat rozdzielczości lub głębi. Wykorzystano tutaj dodatkowy filtr częstotliwościowy w płaszczyźnie Fouriera, by filtrować odpowiednie częstotliwości dla każdego koloru, oraz odpowiednie kąty padania światła, by kolory były rozdzielone w częstotliwości, ale sumowane w obrazie. W tym układzie zademonstrowano eksperymentalnie szerokie pole widzenia $>30^\circ$, wysoką

rozdzielczość i wierne odwzorowanie głębi, bez utraty klatek czy konieczności czasowego rozdzielania kolorów. Aby hologram komputerowy był realistyczny, musi odtwarzać takie sygnały wizualne jak cieniowanie, tekstury, refleksy oraz zasłonięcia. W pracy [P2] zaproponowano modyfikację istniejącego algorytmu Phase-Added Stereogram (PAS), nazwaną Spherical Phase Added Stereogram (S-PAS), która eliminuje ukryte elementy w chmurze punktów. Dodatkowe wrażenie pełnego zanurzenia, wymaga wyświetlania szerokiego pola widzenia dla wysokiej jakości zawartości holograficznej. Istniejące metody (np. zmniejszanie rozmiaru piksela SLM lub stosowanie oświetlenia sferycznego) pomagają poszerzyć pole widzenia, ale generowanie treści holograficznych pozostaje ograniczone czasem oraz kompromisami w jakości. W publikacji [P3] zaproponowano metodę aktualizacji hologramu (hologram update) dla systemu szerokokątnego wyświetlacza, w której hologram jest powiązany z pozycją oka — dzięki temu ponowne obliczanie pełnej klatki nie jest potrzebne przy niewielkich zmianach perspektywy, co znacząco przyspiesza generację treści bez utraty jakości. Z kolei w publikacji [P9] zaproponowano nowy wysokowydajny algorytm w dziedzinie częstotliwości, który lepiej radzi sobie przy jednoczesnych czynnikach takich jak szeroki kąt widzenia i wysoka rozdzielczość, oraz przy zachowaniu efektywności obliczeniowej. W celu dalszej poprawy jakości rekonstrukcji dla szerokiego kąta i zachowania efektywności obliczeń, w pracy [P11] zaproponowano metodę Spherical Reference Frequency Domain Method (SFDM). Technika ta działa w dziedzinie częstotliwości i uwzględnia częstotliwościowo zależne pod-hologramy, co pozwala dopasować rozmiar fragmentów hologramu w zależności od kąta, dzięki czemu efektywnie wykorzystuje cały zakres częstotliwości SLM. W większości przedstawionych prac autor miał wkład w konstrukcji układów wyświetlaczy w konfiguracji bez i ze źrenicą i w przeprowadzeniu stosownych eksperymentów z rekonstrukcją holograficzną oraz w tworzeniu narzędzi analizy danych.

Analizę źródeł przedstawioną w publikacjach dokonano baz zarzutu. Autor tak w przewodniku jak i w załączanych publikacjach wskazuje aktualny stan wiedzy na bazie literatury światowej. Tematyka pracy podjęta przez pana Idicula jest bardzo dynamicznie rozwijana przez wiele ośrodków na świecie i wpisuje się w bardzo ważne wyzwania technologiczne, które w najbliższej przyszłości będą miały istotne znaczenie dla rynku technologicznego od sektorów medycznych, poprzez rozrywkę, transport czy też obronność. We wszystkich tych obszarach aktywności niezbędna jest poprawa skuteczności przekazywania informacji poprzez systemy rzeczywistości wirtualnej i zanurzonej, które będą wygodne w użytkowaniu codziennym. W obecnym wydaniu system jest nadal kosztowny, ale wyniki prac pana Idicula i zespołu prof. Kozackiego dają wiarygodne dane pomiarowe wskazujące na realne fizyczne ograniczenia metody, co jest niezbędne aby w przyszłości lepiej projektować wyświetlacze do oka.

Przyjęta przez kandydata metodyka badań nie budzi zastrzeżeń we wszystkich przedstawionych pracach. Jakość publikacji jest na bardzo dobrym poziomie, porównywalna do prac publikowanych przez grupy badawcze z najlepszych ośrodków badawczych publikujących w tej dziedzinie. Zaproponowana tematyka i sposób rozwiązywania problemów celuje w samo sedno rozwoju metod profilometrii holograficznej i najnowszych osiągnięć technologii wyświetlaczy.

W przedstawionych pracach zaproponowano szereg oryginalnych rozwiązań sprzętowych, metod analizy danych pomiarowych i algorytmów rekonstrukcyjnych. Na szczególną uwagę zasługuje technika wyświetlania kolorowego w szerokich kątach z wykorzystaniem metod jednoekspozycyjnych oraz pojedynczego modulatora przestrzennego fazy. Zaprezentowane publikacje napisane są przejrzystie, językiem angielskim na dobrym poziomie. Nie mam zastrzeżeń do strony edytorskiej i zawartości merytorycznej wszystkich publikacji. Autor wykazał umiejętności przedstawiania celu pracy i uzyskanych wyników.

Jedną z nielicznych słabości przedstawionej rozprawy doktorskiej jest spora liczba błędów językowych, skrótów myślowych lub żargonowego użycia języka, które utrudniają pełne zrozumienie treści przewodnika dla osoby niebędącej ekspertem w dziedzinie metod holografii cyfrowej. Poniżej podaję kilka przykładów, które narzuciły się podczas czytania treści rozprawy:

1. Niektóre skróty pominięte są w „glossary” – warto byłoby dodać więcej skrótów pojawiających się bardzo często w przewodniku.
2. Spotyka się brak jednolitości w stosowaniu wyrażen łączonych, np.: „wide angles – vs wide – angles” Non-Pupil vs non-pupil, highquality vs high-quality, itp.
3. Błąd stylistyczny str 17 zdanie „, OC, which captures holograms...” nie powinno rozpoczynać się od skrótu.
4. Rozdział 1.3 3 linia zdanie: „, Digital Holographic Profilometry (DHP), a key application ...” jest błędnie sformułowane – trudno zrozumieć jego sens.
5. Rozdział 1.4 7 linia „,... by reconstructing object wavefronts...” to skrót myślowy i raczej chodziło o kontrolę czoła fali światła rozproszonego do obiektu.
6. Rozdział 1.4 „, Thus, large FoV resulting in generation of smaller eyebox at the output of the display” – jest trudne do zrozumienia bez użycia czasownika.
7. Rozdział 2.2 p 3 “...measuring high NA objects...” czy “ ...when high NA object is illuminated..” – tutaj mamy do czynienia z żargonowym określeniem obiektów, których obrazowanie wymaga obiektywu o wysokiej wartości apertury numerycznej gwarantującej bezstratne obrazowanie z wymaganą rozdzielczością poprzeczną. Należałoby najpierw wprowadzić tę definicję na użytek tej konkretnej pracy.
8. Rozdział 2.3.1 p1. zdanie „, ...which produce coherent, high contrast speckles that reduce the image quality significant” – plamki nie są spójne tylko światło, które je generuje.

9. Rozdział 2.3.1 p1, zdanie "...causing loss of fine details while reconstruction." – nieco niezrozumiałe.
10. Rozdział 2.3.1 p1, wyrażenie "support area for each point." – wymagałoby zdefiniowania.
11. Rozdział 2.3.1. p.2 zdanie: "First, with wavefront reconstruction is redirected to a given location, realized using a scanning element" jest trudne do zrozumienia.
12. Rozdział 2.3.1 p2, wyrażenie "horizontally separate" – należałoby użyć „horizontally separated”.
13. Rozdział 2.3.1 p2, zdanie „According to the PSR the size of the extended eyebox equals 17.6 mm for frequency equal to zero and 20 mm for frequency equal to maximum FOV.” Jest trudne do zrozumienia – o jakie częstotliwości chodzi autorowi?
14. Rozdział 2.3.1 p3, zdanie: "As a result, they uniquely produce highly realistic 3D reconstructions with all perceptual depth cues." – co dokładnie oznacza wyrażenie "perceptual depth cues"?
15. Rozdział 2.3.1 p4, wyrażenie "3D depth" jest do pewnego stopnia tautologią - głębia wymaga zwykle rekonstrukcji 3-D.
16. Rozdział 2.3.1 p4, zdanie: „Each RGB channel occupies a frequency band of different size and positions.” – zakładam, że chodzi o przestrzeń częstotliwości przestrzennych.
17. Rozdział 2.3.2 p2 „The first evaluation evaluated...” – powtórzenie łatwe do uniknięcia.
18. Rozdział 2.3.2 p2, wyrażenie: "...resulted in limiting the viewing angle" lepiej brzmiałoby "...resulted in limitation of the viewing angle”.
19. Rozdział 2.3.2 p5, zdanie "This is because such a representation is more efficient for generating holograms since the object point has a low bandwidth." jest niezrozumiałe.

Podsumowując stwierdzam, że praca doktorska Pana magistra Moncy Sajeewa Idicula w pełni spełnia warunki stawiane pracom doktorskim przez ustawę o tytule Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z późniejszymi zmianami) i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Oceniam, że praca jest wybitnie dobra i ze względu na oryginalność i znaczenie wprowadzonej metody kolorowego holograficznego wyświetlacza do oka o zoptymalizowanej konstrukcji stawiam wniosek o wyróżnienie pracy.

Z poważaniem,

