Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki
ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa
tel.: 22 55 32 080
e-mail: sekretariat@igf.fuw.edu.pl
www.igf.fuw.edu.pl

Prof. dr hab. Tomasz Szoplik
tszoplik@mimuw.edu.pl
Tel: 22 55 32 038
Kom: 668 420 534

Warszawa, 27 sierpnia 2024

Recenzja
rozprawy doktorskiej
mgra inż. Rafała Kukołowicza
„Holographic content generation for wide-angle near-eye displays"
wykonanej na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej

Formalną podstawę opracowania niniejszej recenzji stanowi pismo z dnia 25 czerwca 2024 roku Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne na Politechnice Warszawskiej Pana prof. dr hab. inż. Tomasza Stareckiego, a w zakresie merytorycznym Ustawa - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późniejszymi zmianami).

Rozprawa doktorska pana mgra inż. Rafała Kukołowicza, która ma postać napisanej po angielsku monografii naukowej połączonej ze zbiorem opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, spełnia wymogi formalne. Recenzowana rozprawa doktorska przedstawia oryginalne rozwiązanie problemu naukowego o poważnym znaczeniu gospodarczym.

Monografia stanowiąca spójną całość liczy 85 stron, na które składa się 16 stron wstępu, 48 stron merytorycznego opisu 11 publikacji wieloautorskich w czasopismach z Journal Citation Reports, w tym 3 w których jest pierwszym autorem oraz 5 recenzowanych publikacji pokonferencyjnych, w tym 2 w których jest pierwszym autorem oraz 9 stron bibliografii. Wszystkie te publikacje pochodzą z lat 2020-2024. Na stronach 86-236 znajdują się kopie artykułów z czasopism z JCR oraz recenzowanych publikacji w materiałach pokonferencyjnych, wszystkie są pokazane w kolejności przedstawionej w tabeli 2.1 na str. 27-30. Tabela 2.1 dodatkowo zawiera informację o współczynniku oddziaływania (IF) czasopism, punkty Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (MNiSW), rok wydania i liczbę cytowań według Google Scholar z dnia 10 czerwca 2024. Warto zauważyć, że od 10 czerwca do 27 sierpnia (kiedy piszę tę recenzję) liczba cytowań artykułów wzrosła z 59 do 74, co świadczy o aktualności rozprawy.

Pan mgr Rafał Kukołowicz wykonał swą rozprawę doktorską na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej pod opieka Pana prof. dr hab. inż. Tomasza Kozackiego. Wyznaczona tematyka pracy dotyczyła rozwoju komputerowych metod tworzenia hologramów z horyzontalną paralaksą i technik ich odczytu w szerokim polu widzenia. Sprawa odczytu hologramów w szerokim kącie widzenia w holograficznych displejach bliskoocznych jest aktualnym problemem badawczym na świecie. Poza poszukiwaniem nowych algorytmów tworzenia hologramów pewnie więcej pracy wymaga wprowadzenie nowych technologii aby usunąć ograniczenia sprzętowe.

Rozprawa dotyczy opracowania kilku oryginalnych metod generacji zawartości hologramów wyświetlanych w szerokokątnych displejach bliskoocznych. Temat jest niezwykle istotny w dobie obecnej cywilizacji obrazkowej. Wprawdzie jeszcze kilka lat temu w reportażach z Polski pokazywano zdjęcia z warszawskiego metra, w którym pasażerowie czytali zwykłe książki co wymagało przekładania stron, a tylko niektórzy mieli w ręku czytniki książek Kindle'a. Obecnie prawie wszyscy zaraz po zajęciu miejsca sięgają po telefony komórkowe i nie odrywają oczu od displejów przez całą drogę. W smartfonach z dwuwymiarowymi displejami możemy przyglądać internet, reklamy i wymieniać wiadomości tekstowe. Jest oczywiste, że holograficzne, trójwymiarowe, szerokokątne displeje bliskooczne zdobędą wielkie powodzenie.

Dla podkreślenia wagi tematyki rozprawy w Streszczeniu pada zdanie: „Wśród istniejących metod i algorytmów generacji hologramów temat szerokiego kąta, co do zasady jest pomijany." Jestem przekonany, że Autor zna kilka ważnych prac z ostatniego dwudziestolecia: (1) Yatagai, T., Sando, Y. (2006). Wide-Angle Computer-Generated Holograms for 3-D Display. In: Poon, TC. (eds) Digital Holography and Three-Dimensional Display. Springer, Boston, MA, https://doi.org/10.1007/0-387-31397-4_9", którą sam cytuje w pracy P6 gdzie jest pierwszym autorem, oraz (2) Extended viewing angle holographic display system with tilted SLMs in a circular configuration. T. Kozacki, M. Kujawińska, G. Finke, B. Hennelly, and N. Pandey, Appl. Opt. 51(11) 1771-1780 (2012). Ponadto, w pracy P4 w Optics Letters z 2021 roku cytuje kilka publikacji [4-9] z lat 2010-2019. W rozprawie Pan Kukołowicz kompetentnie przeprowadził analizę prac innych autorów.

Ważnym elementem rozprawy jest opracowanie wydajnych i dokładnych sposobów numerycznej rekonstrukcji hologramów szerokokątnych o ograniczonych wymaganiach obliczeniowych. Ponadto, autor rozprawy opracował szereg nowych, wydajnych algorytmów do komputerowego tworzenia hologramów przeznaczonych dla displejów o różnej konfiguracji.

W artykule P1 opublikowanym w Applied Optics w 2020 roku opracowano metodę dokładnej rekonstrukcji hologramów cyfrowych z paralaksą wyłącznie horyzontalną dzięki operacjom wykonywanym na widmie kątowym, które propaguje się poza obszarem przyosiowym. Gdy pole wejściowe w płaszczyźnie źrenicy ma większy zasięg niż pole w obszarze ogniskowym to siatkę próbkowania można zdefiniować na skończonym obszarze w płaszczyźnie wyjściowej zwanym kafelkiem. Wtedy pole wejściowe dzieli się na wiele oddzielnych obszarów przestrzennych o rozmiarze kafelka. Kafelki wejściowe w kierunku poziomym są dodawane spójnie i ten jeden zsumowany kafelek jest propagowany algorytmem szybkiej transformaty Fouriera co redukuje obliczenia i ogranicza wykorzystanie pamięci. W algorytmie FFT przekształcaną macierz uzupełnia się zerami w kierunku x żeby uniknąć aliasingu przestrzennego. W rezultacie uzyskuje się rekonstrukcję hologramów cyfrowych z paralaksą horyzontalną poza przybliżeniem paraksjalnym.

W artykule P2 opublikowanym w Optics Express w 2021 roku kontynuowany był problem uzyskania wysokiej jakości hologramów cyfrowych o dużym kacie widzenia w kierunku x i pozbawionych paralaksy pionowej. Oszczędne obliczenia numeryczne z wykorzystaniem możliwie najmniejszego iloczynu przestrzeni i częstości przestrzennych, który przekracza jednak poziom dziesiątek gigapikseli, sa możliwe dzięki połączeniu holografii Fouriera i algorytmu stereogramu z dodaną fazą. Autorzy proponują stosowanie cyfrowych hologramów Fouriera z paralaksą poziomą do rekonstrukcji scen trójwymiarowych dzięki nowej technice rekonstrukcji za pomocą cylindrycznych fal parabolicznych w kierunku x. Opracowana technika zwartego (kompaktowego) iloczynu przestrzeni i pasma częstości pozwala na uzyskanie zerowego wypełnienia w celu dokładnej rekonstrukcji pola falowego i przy zachowaniu wysokiej rozdzielczości przestrzennej.

Opracowane techniki odtwarzania pola falowego z hologramów cyfrowych były weryfikowane w doświadczeniach numerycznych, w których nie ma ograniczenia stałej sieci pikseli i są możliwe rozdzielczości wielokrotnie przekraczające tę, którą dają wyświetlacze Full HD (1920 x 1080 pikseli).

Displej 4K ma 4 razy więcej pikseli 3840 x 2160, zaś displeje 8K mają macierze 7680 x 4320 z liczbą pikseli horyzontalnych około 8000. W optycznej weryfikacji algorytmów numerycznych proponowanych w publikacjach P2-P5, P7, P8, P10, P11 i K5 był wykorzystany przestrzenny modulator światła 4K HoloEye GAEA-2 z macierzą 2160×3840 pikseli, stałą sieci $\Delta = 3{,}74$ μm i aperturą $8\times14{,}3$ mm^2 zwykle z oświetleniem o długości fali $\lambda = 0{,}64$ μm.

Artykuł P3 opublikowany w Photonic w 2021 roku jest poświęcony hologramom tworzonym komputerowo z widokiem szerokokątnym, które dają możliwość oglądania dużych obiektów w 3 wymiarach. Praca dotyczy usuwanie okluzji (zamknięcia) między powierzchniami obiektów wirtualnych lub rzeczywistych w szerokokątnych hologramach tworzonych komputerowo dzięki technice stereogramu z dodaną fazą. Autorzy tej pracy zapewniają, że mimo sporej popularności techniki zamykania (okluzji) dużych obiektów między powierzchniami, która służy poprawnemu postrzeganiu obiektów, ich metoda wykorzystująca stereogram z dodaną fazą typu Fouriera (PAS) dotyczy displejów szerokokątnych czego dowodzą w doświadczeniach numerycznym i optycznym.

Artykuł P4 opublikowany w Optics Letters w 2021 roku przez 10 współautorów polskich i koreańskich przedstawia szerokokątny displej holograficzny z obniżonym szumem plamkowym, który generuje obrazy o wymiarach 306 mm x 161 mm w scenie o głębokości 700 mm. Układ doświadczalny zbudowano w jednosoczewkowej konfiguracji z wykorzystaniem fazowego modulatora 4K HoloEye GAEA-2Wp oświetlonego falą płaska, z którego +1 rząd ugięcia daje obraz w kącie $\alpha_x = 25{,}96°$ i dwukrotnie mniejszym w kierunku wertykalnym. W pracy zademonstrowano odtworzenie wysokiej jakości obrazu o wysokiej rozdzielczości i pozbawionego szumu. Pozwala to mieć nadzieję na stworzenie displeja video z sekwencji pełnych klatek.

Artykuł P5 opublikowany w Photonics Letters of Poland w 2021 roku jest poświęcony ujednoliceniu powiększenia elementów obrazu dla wszystkich odległości od osi optycznej szerokokątnego displeja holograficznego. Dystorsja, której obecności można się spodziewać w displeju szerokokątnym, jest redukowana w procesie wstępnej kalibracji testowego obrazu macierzy punktów. Wyznaczonych w ten sposób współczynników dystorsji używa się do korygowania obrazu.

Pan Kukołowicz w rozprawie szukał nowych algorytmów zapisu i odczytu szerokokątnych hologramów tworzonych na komputerze z ograniczoną mocą obliczeniową i wniósł w tej dziedzinie kilka ciekawych idei. Podstawą pracy (P6) opublikowaną w Applied Science w 2022 roku był udział w projekcie, który miał na celu wprowadzenie nowatorskiej koncepcji holograficznego wyświetlacza bliskiego oka, który naśladuje ludzki układ wzrokowy. Pomysł polegał na szerokokątnym obrazowaniu holograficznym z paralaksą horyzontalną i rozdzielczością zależną od przestrzeni, czyli malejącą z odległością od osi pola widzenia. Drugą zrealizowaną ideą było wykorzystanie niekoherentnych diod LED jako źródła światła w holograficznym wyświetlaczu bliskoocznym, którą opublikował w pracy P7 w Optics Express w roku 2022. Niekoherentne źródła światła obniżały poziom szumu plamkowego ale utrzymywały zdolność rozdzielczą podobną jak w oświetleniu spójnym. Dzięki kontroli natężeń światła z macierzy diod oko mogło mieć odpowiedni poziom iluminacji do utrzymania wysokiej rozdzielczości obrazu w pełnej objętości rekonstrukcji. Poszerzenie horyzontalnej szerokości pola widzenia w holograficznym displeju bliskoocznym uzyskano przez użycie pojedynczej pionowo zorientowanej siatki dyfrakcyjnej co poszerzało rozmiar *eyebox* w kierunku poziomym. Zostało to przedstawione w pracy P8 w Optics Express w 2023 roku. Termin eyebox odnosi się do objętości, w której oko otrzymuje trójwymiarowy obraz spełniający przyjęte kryteria. Te kryteria wyznaczone są przez przyjęte wielkości pola widzenia i rozdzielczości obrazu. Czysto praktycznym celem projektu było opracowanie wydajnych metod komputerowego generowania hologramów dopasowanych do wyświetlania trójwymiarowych informacji w technologii displejów bliskoocznych dla celów rzeczywistości wirtualnej i rozszerzonej (augmented).

Artykuł P9 opublikowany w Photonics Research w maju 2024 roku wprowadza nowatorski pomysł szerokokątnego cyfrowego displeja holograficznego, w którego scenie można zapisać obiekty większe niż przyjęte pole widzenia. Istota pomysłu polega na zapisie fali przedmiotowej dużego obiektu, którego rozdzielczość jest ograniczone przestrzennie przez aperturę prostokątną, następnie podlega przekształceniu Fouriera i wraz z falą odniesienia jest zapisana na czujniku CMOS (JAI SP-20000M-USB o rozdzielczości 5120 × 3840 pikseli ze stała sieci $\Delta = 6{,}4$ μm. Falę odniesienia formuje stojący w jej biegu macierzowy aktuator piezoelektryczny, który nadając wybrane przesuniecie fazowe daje falę odniesienia osiową lub pozaosiową. W artykule P9 opracowano system o kącie pola widzenia 25° × 19°. Natommiast, opracowane numeryczne metody generowania hologramów mają znacznie większy kąt pola widzenia. W związku z tym mam pytanie, jakie jest ograniczenie kąta pola widzenia uzyskanego w publikacji P9 i czy można je zwiększyć?

Praca P10 opublikowana w Optics Express w kwietniu 2024 roku zawiera wyrafinowane teoretyczne i numeryczne, wsparte doświadczeniami, rozważania nad geometrycznymi manipulacjami zawartością holograficzną bliskoocznych displejów. Metoda swobodnej manipulacji geometrią obrazu składa się z dwóch paraksjalnych niezależnych operacji: osiowego przesunięcie obrazu oraz poprzecznego przesunięcia i skalowania. Autorzy biorą pod uwagę wyświetlanie hologramów wąsko i szerokokątnych ograniczonych lub nie do przestrzeni przyosiowej w celu rekonstrukcji monochromatycznych i kolorowych obiektów. Dokładne omówienie elementów tej obszernej publikacji (16 stron) wychodzi poza zakres mojej recenzji. W sierpniu 2024 roku nie można jeszcze mówić o cytowalności pracy.

Ostatnia publikacja P11 ukaże się w lutym 2025 roku w 181. tomie czasopisma Optics and Laser Technology. Praca dotyczy metody tworzenia szerokokątnego hologramu generowanego komputerowo w chmurze punktów dzięki reprezentacji częstotliwości fal sferycznych w domenie częstotliwości. Metoda domeny częstotliwości dla takich hologramów opiera się na reprezentacji widmowej fali sferycznej każdego punktowego źródła obiektu. Ponieważ te punkty ze sobą nie oddziałują to macierze opisujące współrzędne (x, y, z) punktów obiektu są rzadkie (sparse) i separowalne. Rzadkość i odpowiadająca jej wydajność algorytmu rośnie wraz z kątem oglądania. Praktyczne znaczenie ma dowód, że dzięki przestrzennej reprezentacji częstotliwości fal sferycznych można wydajnie obliczać hologramy dużych i szczegółowych obiektów 3D z polem widzenia w zakresie 60°–100° i dla rozdzielczości 4K, 8K i 16K.

Zgodnie z wymaganiami Rady Doskonałości Naukowej Pan Kukołowicz przestawił w Tabeli 2.4 (str. 72-73) swój wkład do publikacji składających się na rozprawę.

✓ W pracy P1 wykonał numeryczną implementację zaproponowanych schematów wypełniania i numeryczną implementację metody wielokrotnej szybkiej transformaty Fouriera z techniką syntetycznej apertury (mFFT-AS) do rekonstrukcji hologramu. Wykonał również testy dokładności i rekonstrukcji numerycznych hologramów cyfrowych z paralaksą horyzontalną.

✓ W pracy P2 oprogramował i udoskonalił dla celów hologramów Fouriera algorytm zwartego (kompaktowego) iloczynu przestrzeni i pasma częstości z widmem kątowym (CSW-AS) i algorytm syntetycznej apertury stereogramów z dodaną fazą (SA-PAS). Generował hologramy cyfrowe z paralaksą horyzontalną (HPO-CGH), numerycznie odczytywał hologramy optyczne (OH) i komputerowe (CGH) i wykonał testy dokładności.

✓ W pracy P3 w obliczeniach równoległych optymalizował metodę okluzji (zamknięcia) obiektów. Szukał optymalnych rozmiarów segmentów. Wykonał testy dokładności i szybkości opracowanej metody. Generował hologramy komputerowe i rekonstrukcje numeryczne.

✓ W pracach P4 i P5 badał aberracje zniekształceń i propozycje rozwiązania korekcyjnego.

✓ W pracy P6 sformułował teorię. Badał optymalne warunki aproksymacji. Przeprowadził testy numeryczne. Generował hologramy komputerowe i ich rekonstrukcje numeryczne.

✓ W pracy P7 optymalizował i modyfikował algorytm hologramu tworzonego na komputerze z zastosowaniem obliczeń równoległych. Wykonał testy wydajności i szybkości. Generował dane holograficzne.

✓ W pracach P8 i P11 generował dane holograficzne.

✓ W pracy P9 zaprojektował i przedstawił zasady działania nowej konfiguracji szerokokątnego hologramu cyfrowego. Opracował proces kalibracji. Zbadał aberrację krzywizny pola i opracował algorytm korekcyjny. Wykonał doświadczenia optyczne i rekonstrukcje numeryczne.

✓ W pracy P10 koordynował pracę zespołową. Sformułował teorię. Badał warunki manipulacji i dokładności proponowanej metody. Generował dane holograficzne.

✓ W pracach K4 i K5 generował dane holograficzne

Podsumowanie:

Przedłożona mi do recenzji rozprawa może być podstawą uzyskania stopnia doktora nauk technicznych w świetle wymagań formalnych stawianych przez odpowiednie ustawy. Proszę więc o dopuszczenie mgra inż. Rafała Kukołowicza do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Biorąc pod uwagę wysoki poziom rozprawy, dużą wartość prac poświęconych aktualnemu problemowi odczytu hologramów z szerokim kącie widzenia w holograficznych displejach bliskoocznych występuję do Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej o przyznanie doktoratu z wyróżnieniem.