

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Jaroszewicz
Centralna Izba Pomiarów Telekomunikacyjnych (Z-12)
Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Szachowa 1, 04-894 Warszawa
e-mail: mmtzjaroszewicz@post.pl

ul. Szachowa 1
04-894 Warszawa
tel.: [+48 22] 512 81 00
fax: [+48 22] 512 86 25
e-mail: info@il-pib.pl
www.il-pib.pl

Warszawa, dnia 12 września 2024 roku

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Rafała Kukołowicza p.t. „Holographic Content Generation for Wide-Angle Near-Eye Displays”

Pan mgr inż. Rafał Kukołowicz w swojej rozprawie doktorskiej noszącej tytuł „Holographic Content Generation for Wide-Angle Near-Eye Displays” stawia sobie za cel opracowanie holograficznych wyświetlaczy dla celów szerokokątnej projekcji bliskookucznej i rozwiązanie problemów, jakie pojawiają się przy realizacji tak postawionego zadania. Lista tych problemów jest dosyć długa i obejmuje takie zagadnienia jak:

- opracowanie algorytmów generowania szerokokątnych hologramów przeznaczonych do holograficznych wyświetlaczy szerokokątnej projekcji bliskookucznej (holographic near-eye displays with wide-angle projection HNED) typu Fresnela i Fouriera;
- opracowanie algorytmów generowania szerokokątnych hologramów przeznaczonych do holograficznych wyświetlaczy szerokokątnej projekcji bliskookucznej, które mogą być użyte do wstępnego renderowania dużych danych holograficznych;
- opracowanie wydajnych algorytmów numerycznego odtworzenia szerokokątnych hologramów z zoptymalizowanym i zredukowanym parametrem space–bandwidth product (SBP);
- opracowanie algorytmów korekcji aberracji krzywizny pola i dystorsji szerokokątnych hologramów;
- propozycja nowego rozwiązania zastosowania przyosiowych hologramów w wyświetlaczach szerokokątnej projekcji bliskookucznej HNED;
- opracowanie i rozwój nowatorskiego systemu nagrywania umożliwiającego rejestrację szerokokątnego hologramu bez aliasingu.

Rozprawa składa się ze spójnego tematycznie zbioru artykułów poprzedzonego streszczeniem, wstępem i przewodnikiem po publikacjach zawierającym także podsumowanie oraz omówienie przyszłych kierunków badań, które mogą stanowić kontynuację omawianej pracy. Cała dysertacja liczy w sumie 236 stron, z czego pierwsze 85 stron zawierają streszczenie, spis treści, glosariusz oraz wspomniane już wstęp i przewodnik po publikacjach oraz bibliografię. Pozostałe 151 stron zajmuje zbiór publikacji stanowiących przedmiot rozprawy. Składa się on z czterech prac opublikowanych w materiałach konferencyjnych oraz jedenastu publikacji wydanych w indeksowanych czasopiśmie z listy Journal Citation Reports (JCR), tj. z tzw. listy filadelfijskiej.

Wstęp dysertacji obejmuje krótkie podsumowanie dotychczasowej działalności naukowej autora, omówienie tematów poruszonych w rozprawie oraz sformułowanie celów, jakie zamierza dowieść. Na koniec wstępu zostało przedstawione zwięzłe objaśnienie terminu holografia cyfrowa, w tym metody rejestracji hologramów cyfrowych i procesu ich cyfrowego odtworzenia. Ponadto zostały opisane różne metody otrzymywania hologramów generowanych komputerowo i na koniec omówienie holograficznych wyświetlaczy dla celów szerokokątnej projekcji bliskookucznej.

Drugi rozdział rozprawy zatytułowany „Przewodnik po publikacjach” zaczyna się listą publikacji wchodzących w skład rozprawy razem z ich podstawowymi wskaźnikami bibliometrycznymi takimi jak impact factor czasopism, w których zostały opublikowane, ilości punktów przyznawanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego za publikację w danym czasopiśmie oraz ilości cytowań, które ma każda z wymienionych prac. Dalsza część tego rozdziału poświęcona jest przedstawieniu algorytmów opracowanych przez autora w celu wiarygodnej propagacji numerycznej szerokokątnych hologramów, gdzie z jednej strony istnieje konieczność wzięcia pod uwagę dużej wartości kąta pomiędzy wiązką przedmiotową i odniesienia i co za tym idzie wysokich wartości częstości przestrzennych rejestrowanego hologramu, co wyklucza szereg metod przybliżonych, np. optyki przyosiowej, tj. dyfrakcji w przybliżeniu Fresnela, a z drugiej strony potrzeba redukcji gigantycznych zbiorów danych, które wtedy z konieczności będą powstawać.

I tak, dla rozwiązania problemu numerycznego odtworzenia szerokokątnych hologramów zaproponowano metodę wykorzystującą widmo kątowe fal płaskich do symulacji propagacji (multi-FFT Angular Spectrum (mFFT-AS) method) opisaną w pracy P1, a zmniejszenie wymogu zasobów obliczeniowych przez opracowanie algorytmu Compact Space Bandwidth AS (CSW-AS) w pracy P2. Z kolei praca P3 proponuje modyfikację algorytmu Phase Added Stereogram (PAS), gdzie w każdym fragmencie hologramu odpowiednio nachylona płaska fala zastępuje odpowiadający jej fragment fali sferycznej.

Kolejnym zagadnieniem rozwiązany w rozprawie jest kwestia kompensacji lub zmniejszenia niektórych aberracji towarzyszących procesowi rejestracji i odtworzenia szerokokątnych hologramów.

Na uwagę zasługuje zakończenie przewodnika po publikacjach, gdzie autor pokrótce nakreśla kierunki dalszych badań, które mogłyby zostać podjęte jako kontynuacja wyników otrzymanych w rozprawie. Z uwagi na nowe podejście do problematyki holograficznych wyświetlaczy dla celów szerokokątnej projekcji bliskooczonej podjęte przez autora, tych możliwości różnej natury pojawia się wiele. W pierwszej kolejności możliwym wyborem jest zastosowanie soczewek o krótszej ogniskowej w cyfrowym szerokokątnym układzie holograficznym WADH (Wide-Angle Digital Holographic). Oznacza to tym samym konieczność dalszych prac nad kompensacją aberracji wprowadzonych w ten sposób do układu. Rejestracja kolorowych hologramów z kolei wymagać będzie podjęcia problemu eliminacji aberracji chromatycznej. Podobnie wymagane są dalsze prace mające na celu usprawnienia algorytmów generacji hologramów o szerokim polu widzenia i uwzględnienie efektu przesłaniania obiektów. Jako kolejne zagadnienie możliwe do zbadania autor stawia kwestię zastosowania sieci neuronowych do generacji hologramów.

Nie wnoszę uwag dotyczących układu pracy, bądź też sposobu ujęcia tematu przez autora. Autor w długiej serii artykułów składających się na rozprawę przedstawił rozwiązania problemów, które sformułował jako cel rozprawy. Należy dodać, że ilość artykułów składających się na rozprawę i ranga czasopism, w których zostały opublikowane z dużym naddatkiem przekraczają wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Również ilość i znaczenie problemów rozwiązanych w rozprawie znacznie przekracza przyjmowane zazwyczaj w tej mierze kryteria. Uważam, że tezy postawione w rozprawie zostały dowiedzione. Chętnie natomiast dowiedziałbym się więcej na temat kompensacji aberracji, przy czym chcę podkreślić, że nie traktuję tego jako braku, bo kwestii tej zostały poświęcone prace P4, P5 i P9, a raczej jako wyraz ciekawości, zwłaszcza, że sam autor podkreśla jej znaczenie w omówieniu możliwych dalszych zagadnień badawczych. Problem ten, w szczególności w odniesieniu do samych wyświetlaczy holograficznych cieszy się zainteresowaniem badaczy, czego przykładem mogą być przytoczone tu poniżej prace:

Tobias Haist, Alexander Peter, and Wolfgang Osten, "Holographic projection with field-dependent aberration correction," *Opt. Express* **23**, 5590-5595 (2015)

Dongheon Yoo, Seung-Woo Nam, Youngjin Jo, Seokil Moon, Chang-Kun Lee, and ByoungHo Lee, "Learning-based compensation of spatially varying aberrations for holographic display [Invited]," *J. Opt. Soc. Am. A* **39**, A86-A92 (2022)

Seung-Woo Nam, Dongyeon Kim, and ByoungHo Lee, "Accelerating a spatially

varying aberration correction of holographic displays with low-rank approximation," *Opt. Lett.* **47**, 3175-3178 (2022)

ul. Szachowa 1
04-894 Warszawa
tel.: [+48 22] 512 81 00
fax: [+48 22] 512 86 25
e-mail: info@il-pib.pl
www.il-pib.pl

Dorobek publikacyjny pana mgr inż. Rafała Kukołowicza obejmuje szesnaście prac, z czego jedenaście artykułów zostało opublikowanych w wysoko notowanych indeksowanych czasopismach JCR z tzw. listy filadelfijskiej, cztery komunikaty konferencyjne zostały opublikowane w materiałach konferencji *Frontiers in Optics/Laser Science* organizowanych przez Optica (dawniej Optical Society of America) i jeden w *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*.

Komunikaty konferencyjne:

- K1. Juan Martinez-Carranza, Rafał Kukołowicz, and Tomasz Kozacki, "Phase Added Stereogram for Calculation of Large Horizontal Parallax Only Computer-Generated Holograms," in *Frontiers in Optics / Laser Science*, B. Lee, C. Mazzali, K. Corwin, and R. Jason Jones, eds., OSA Technical Digest (Optica Publishing Group, 2020), paper FW5A.2.
- K2. Tomasz Kozacki, Weronika Finke, Juan Martinez-Carranza, and Rafał Kukołowicz, "Numerical reconstruction of large HPO Fourier holograms," *Proc. SPIE* **11353**, Optics, Photonics and Digital Technologies for Imaging Applications VI, 113530O (2020).
- K3. Rafał Kukołowicz, Tomasz Kozacki, and Jędrzej Szpygiel, "Digital holographic system of extended angle," in *Frontiers in Optics + Laser Science 2021*, C. Mazzali, T. (T.-C.) Poon, R. Averitt, and R. Kaindl, eds., Technical Digest Series (Optica Publishing Group, 2021), paper FM5C.1.
- K4. Tomasz Kozacki, Rafał Kukołowicz, Juan Martinez-Carranza, and Dominik Draj, "Fast wide-angle computer-generated hologram algorithm using the frequency domain," in *Frontiers in Optics + Laser Science 2023 (FiO, LS)*, Technical Digest Series (Optica Publishing Group, 2023), paper FW6D.4.
- K5. Rafał Kukołowicz, Tomasz Kozacki, Maksymilian Chlipała, Moncy Sajeev Idicula, and Weronika Finke, "Digital hologram manipulation for wide-angle pupil holographic near-eye display," in *Frontiers in Optics + Laser Science 2023 (FiO, LS)*, Technical Digest Series (Optica Publishing Group, 2023), paper JW4A.79.

Artykuły w czasopismach z listy filadelfijskiej:

- P1. Tomasz Kozacki, Juan Martinez-Carranza, Rafał Kukołowicz, and Weronika Finke, "Accurate reconstruction of horizontal parallax-only holograms by angular spectrum and efficient zero-padding," *Appl. Opt.* **59**, 8450-8458 (2020).
- P2. Tomasz Kozacki, Juan Martinez-Carranza, Rafał Kukołowicz, and Maksymilian Chlipała, "Fourier horizontal parallax only computer and digital holography of large size," *Opt. Express* **29**, 18173-18191 (2021).
- P3. Juan Martinez-Carranza, Tomasz Kozacki, Rafał Kukołowicz, Maksymilian Chlipała, and Moncy Sajeev Idicula, "Occlusion Culling for Wide-Angle Computer-Generated Holograms Using Phase Added Stereogram Technique," *Photonics* **8**, 298, (2021).
- P4. Maksymilian Chlipała, Tomasz Kozacki, Han-Ju Yeom, Juan Martinez-Carranza, Rafał Kukołowicz, Jinwoong Kim, Jong-Heon Yang, Ji Hun Choi, Jae-Eun Pi, and Chi-Sun Hwang, "Wide angle holographic video projection display," *Opt. Lett.* **46**, 4956-4959 (2021).
- P5. Jędrzej Szpygiel, Maksymilian Chlipała, Rafał Kukołowicz, Moncy Sajeev Idicula, and Tomasz Kozacki, "Distortion correction for wide angle holographic projector," *Photonics Lett. Pol.* **13**, 79-81, (2021).
- P6. Rafał Kukołowicz, Maksymilian Chlipala, Juan Martinez-Carranza, Moncy Sajeev Idicula, and Tomasz Kozacki. 2022. "Fast 3D Content Update for Wide-Angle Holographic Near-Eye Display," *Appl. Sci.* **12**, 293 (2022).
- P7. Tomasz Kozacki, Maksymilian Chlipala, Juan Martinez-Carranza, Rafał Kukołowicz, and Moncy Sajeev Idicula, "LED near-eye holographic display with a large non-paraxial hologram generation," *Opt. Express* **30**, 43551-43565 (2022).
- P8. Maksymilian Chlipala, Juan Martinez-Carranza, Moncy Sajeev Idicula, Rafał Kukołowicz, and Tomasz Kozacki, "Eyebox expansion with accurate hologram generation for wide-angle holographic near-eye display," *Opt. Express* **31**, 20965-20979 (2023).
- P9. Rafał Kukołowicz, Izabela Gerej, and Tomasz Kozacki, "Wide-angle digital holography with aliasing-free recording," *Photon. Res.* **12**, 1098-1106 (2024).
- P10. Rafal Kukołowicz, Tomasz Kozacki, Maksymilian Chlipala, Moncy Sajeev Idicula, Juan Martinez-Carranza, Weronika Finke, and Izabela Gerej, "Digital holographic content manipulation for wide-angle holographic near-eye displays," *Opt. Express* **32**, 14565-14581 (2024).
- P11. Tomasz Kozacki, Juan Martinez-Carranza, Izabela Gerej, Rafal Kukołowicz, Maksymilian Chlipala, Moncy Sajeev Idicula, „Frequency domain method for wide angle computer generated hologram,” *Opt. Laser Technol.*, **181**, Part A, 111610 (2025).

W obecnej chwili w bazie Web of Knowledge znajduje się jedenaście publikacji pana mgr inż. Rafała Kukołowicza, liczba ich cytowań wynosi czterdzieści, a zostały one przywołane w trzydziestu jeden pracach. Indeks Hirscha publikacji pana mgr inż. Rafała Kukołowicza według bazy Web of Knowledge wynosi cztery. Najczęściej cytowana z prac, tj. Juan Martinez-Carranza, Tomasz Kozacki, Rafał Kukołowicz, Maksymilian Chlipała, and Monecy Sajeev Idicula, "Occlusion Culling for Wide-Angle Computer-Generated Holograms Using Phase Added Stereogram Technique," *Photonics* **8**, 298, (2021) zebrała już siedem cytowań. Następnie, baza Scopus zawiera osiemnaście publikacji autora z sześćdziesiąt dwoma cytowaniami, które znajdują się w czterdziestu trzech cytujących artykułach i z wartością indeksu Hirscha równą pięć. Wspomniana poprzednio najwyżej cytowana praca jest tu przywołana dwanaście razy. Z kolei ogólnodostępna baza Scholar Google przytacza dwadzieścia prac pana mgr inż. Rafała Kukołowicza z liczbą osiemdziesięciu cytowań, a przytoczona poprzednio najwyżej cytowana praca ma czternaście cytowań. Zważywszy na to, że prace te były opublikowane niedawno, bo zaledwie co najwyżej cztery lata temu, to liczbę ich cytowań należy uznać za znaczącą. Należy również spodziewać się, że liczba ta będzie szybko rosła, a to ze względu na to, że artykuły pana mgr inż. Rafała Kukołowicza zostały opublikowane w cenionych i dobrze notowanych czasopiśmie o wysokich wartościach wskaźnika impact factor. Równie ważnym powodem jest znaczenie i wkład prac pana mgr inż. Rafała Kukołowicza w rozwój holograficznych wyświetlaczy dla celów szerokokątnej projekcji bliskooczonej, jak również znaczenie samej tematyki. W moim przekonaniu należy spodziewać się szybkiego wzrostu liczby cytowań w najbliższej przyszłości, który to proces z natury rzeczy jest obciążony pewną bezwładnością i wymaga trochę więcej czasu niż ten, który upłynął od publikacji wyników uzyskanych przez pana mgr inż. Rafała Kukołowicza.

W mojej opinii tezy rozprawy zostały sprawnie i z dobrym skutkiem dowiedzione, a uzyskane wyniki mają istotne znaczenie dla dalszego rozwoju holograficznych wyświetlaczy dla celów szerokokątnej projekcji bliskooczonej. Wziąwszy pod uwagę powody przytoczone w niniejszej opinii uważam, że rozprawa pana mgr inż. Rafała Kukołowicza zasługuje na wyróżnienie. Sądzę, że dodatkowym ważnym argumentem może być fakt, że jeden z artykułów, którego współautorem jest pan mgr inż. Rafał Kukołowicz, został wymieniony w pracy przeglądowej zawierającej omówienie całokształtu dokonań w dziedzinie holograficznych wyświetlaczy szerokokątnej projekcji bliskooczonej. W artykule przeglądowym Myeong-Ho Choi, Woongseob Han, Kyosik Min, Dabin Min, Gyuchan Han, Kwang-Soo Shin, Minseong Kim, and Jae-Hyeung Park "Recent Applications of Optical Elements in Augmented and Virtual Reality Displays: A Review," *ACS Appl. Opt. Mater.* **2**, 1247–1268 (2024) została zacytowana praca umieszczona w poniższej recenzji na poz. 8, tj.



Maksymilian Chlipala, Juan Martinez-Carranza, Moncy Sajeev Idicula, Rafał Kukołowicz, and Tomasz Kozacki, "Eyebox expansion with accurate hologram generation for wide-angle holographic near-eye display," *Opt. Express* **31**, 20965-20979 (2023).

ul. Szachowa 1
04-894 Warszawa
tel.: [+48 22] 512 81 00
fax: [+48 22] 512 86 25
e-mail: info@il-pib.pl
www.il-pib.pl

Należy wspomnieć także, że pan mgr inż. Rafał Kukołowicz mimo młodego wieku uczestniczył w realizacji wielu projektów badawczych i zdobył już doświadczenie także w innych dziedzinach optyki, takich jak interferometria z rozdwojeniem frontu falowego, a także jej zastosowanie do precyzyjnego optycznego systemu pomiarowego służącego do monitorowania jakości wiązki lasera wysokoenergetycznego, czy też w mikroskopii interferencyjnej próbek biologicznych.

Chciałbym również dodać obserwację, która wydaje mi się niezwykle ważna, mianowicie recenzowana rozprawa wpisuje się w szerszy kontekst badań prowadzonych od wielu lat przez cały zespół kierowany przez pana prof. dr hab. Tomasza Kozackiego. Moim zdaniem jest to jeszcze jeden argument przemawiający na rzecz jakości rozprawy i tym samym zasługuje na dodatkowe uznanie.

W konkluzji stwierdzam, że przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska p.t. „Holographic Content Generation for Wide-Angle Near-Eye Displays” zawiera rozwiązanie oryginalnego problemu naukowego dokonane przez pana mgr inż. Rafała Kukołowicza i tym samym spełnia wymogi ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. (Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz. U. 2018 poz. 1668 z późn. zm.) i na tej podstawie wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony oraz o uznanie jej za wyróżniającą.

Zbigniew Jaroszewicz