

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

W Y D Z I A Ł M E C H A T R O N I K I

Rozprawa doktorska

mgr inż. Maksymilian Chlipała

System barwnego holograficznego wyświetlacza 3D o szerokim
kącie pola widzenia z oświetleniem niekoherentnym

Promotor

dr hab. inż. Tomasz Kozacki, prof. PW

WARSZAWA, 2019

Niniejsza praca była współfinansowana przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu HoloTrue3D: wielowiązkowe obrazowanie i pomiary holograficzne programu MAESTRO, nr grantu: UMO-2012/021A/ST7/00365, przez rząd Korei Południowej w ramach projektu GIGAKorea oraz przez Politechnikę Warszawską w ramach zrealizowanych grantów dziekana.

Podziękowania

Panu Promotorowi, prof. nzw. dr hab. inż. Tomaszowi Kozackiemu za wsparcie udzielone podczas realizacji mojej pracy doktorskiej, wskazanie ścieżki rozwoju naukowego, za dzielenie się wiedzą i doświadczeniem, cenny czas spędzony na wspólnych dyskusjach oraz dużą cierpliwość i życzliwość.

Panu dr hab. inż. Michałowi Józwikowi za liczne porady w zakresie technologiczno-eksperymentalnym, wsparcie dobrymi radami oraz dużą życzliwość.

Pani mgr inż. Weronice Zaperty za udostępnienie hologramów cyfrowych obiektów rzeczywistych, życzliwość oraz koleżeńskie relacje.

Panu dr inż. Piotrowi Lechowi Makowskiemu za udostępnienie algorytmów do manipulacji geometrycznych obrazów obiektów rzeczywistych oraz wszelką pomoc naukową.

Pracownikom i doktorantom za wszystkie wspólnie spędzone chwile i niesamowicie miłą atmosferę pracy.

Pracę tę dedykuję rodzinie i najbliższym

Streszczenie

Głównym celem rozprawy było opracowanie, budowa oraz przebadanie barwnego wyświetlacza holograficznego o szerokim kącie pola widzenia z oświetleniem niekoherentnym, który umożliwia uzyskanie wysokiej jakości rekonstrukcji przedmiotu 3D. Cel postawiony w rozprawie doktorskiej został zrealizowany za pomocą nowych algorytmów i układów eksperymentalnych. Wszystkie opracowane rozwiązania pozwalają na efektywne wykorzystanie przestrzeni koherencji niekoherentnego źródła światła.

W pierwszej części rozprawy opracowano i zaimplementowano metodę rekonstrukcji barwy, która umożliwia odtworzenie wysokiej jakości przedmiotów 2D i 3D z zastosowaniem fazowego modulatora SLM oraz diody światła białego. Rozwiązanie pozwala na odtworzenie barwy obiektu z pojedynczego hologramu. W następnej części pracy zademonstrowano system umożliwiający rekonstrukcję dużych obiektów rzeczywistych, które mogą być obserwowane gołym okiem. Jest on zbudowany w konfiguracji wyświetlacza holograficznego z oknem obserwacji, który zmodyfikowany jest o nową ścieżkę przetwarzania pozwalającą na modyfikację geometrii przedmiotów rzeczywistych. Obiekty mogą być odtworzone na dowolnej odległości od modulatora, przesunięte w swojej płaszczyźnie, jak również powiększone. W kolejnej części rozprawy zaprezentowano rozwiązanie umożliwiające rozszerzenie kąta pola widzenia. Realizowane jest ono z wykorzystaniem opracowanego tęczowego wyświetlacza holograficznego. System pozwala na uzyskanie atrakcyjnych rekonstrukcji przedmiotów 3D, których barwa zmienia się wraz z położeniem oka obserwatora. W ostatniej części pracy przebadano właściwości obrazowania holograficznego z zastosowaniem binarnego modulatora DMD i oświetlenia niekoherentnego. Otrzymane wyniki analizy teoretycznej i eksperymentalnej dowodzą, że koherencja czasowa źródła ma dominujący wpływ na jakość rekonstrukcji. Z tego powodu zaproponowano metodę korekcji dyspersji panelu DMD. Dzięki niej możliwe jest uzyskanie obrazów o porównywalnej rozdzielczości do tej, która otrzymana jest z użyciem fazowego modulatora SLM. Każda z opracowanych metod została przebadana numerycznie oraz eksperymentalnie pod kątem jakości i głębi rekonstruowanych przedmiotów.

Słowa kluczowe: obrazowanie 3D, holografia cyfrowa, holografia tęczowa, wyświetlacze holograficzne, rekonstrukcja barwy, korekcja dyspersji, modulator SLM, modulator DMD, oświetlenie niekoherentne, LED.

Abstract

The main goal of the thesis is to develop, build and investigate full color holographic display with wide viewing angle and incoherent light source, which enables obtaining high quality reconstructions of 3D object. The goal has been achieved by implementing novel algorithms and setups. All developed solutions allow for efficient use of incoherent light source.

In the first part of the thesis new reconstruction method has been developed and implemented. It allows reconstruction of high quality 2D and 3D objects with phase only SLM and white light source. The solution ensures full color image from single hologram. In the next part of the thesis novel holographic display setup is presented. It enables reconstruction and observation of large size, real 3D objects. Display is built in viewing window configuration, which is modified by novel imaging path. This solution allows geometrical manipulations of the image. Objects can be recreated at any distance, shifted laterally and magnified. Next method that provides large viewing angle is presented. This task is realized by construction of developed rainbow holographic display. The system allows to reconstruct attractive images of real 3D objects. Their color changes with the position of the viewers eye. In the last part of the thesis imaging properties of binary DMD modulator with incoherent light source is investigated. Obtained results prove that temporal coherence of source has large impact on reconstruction quality. Therefore, in this work dispersion effect of DMD is compensated. The solution enables obtaining high resolution, which is comparable to the one received with phase SLM. All developed methods are investigated numerically and experimentally.

Keywords: 3D imaging, digital holography, rainbow holography, holographic displays, color reconstructions, dispersion compensation, SLM, DMD, incoherent light source, LED.

Spis treści

Streszczenie.....	5
1. Wstęp.....	11
1.1. Wprowadzenie	11
1.2. Cel pracy	13
1.3. Struktura pracy.....	14
2. Przegląd literatury	16
2.1. Metody rekonstrukcji barwy	16
2.2. Metody zwiększenia rozmiaru przedmiotu i kąta pola widzenia.....	19
2.3. Rozwiązania wyświetlaczy holograficznych z oświetleniem niekoherentnym.	26
2.4. Metody rekonstrukcji zespolonej amplitudy przedmiotu.....	28
3. Barwny wyświetlacz holograficzny z pojedynczym, fazowym modulatorem SLM oraz źródłem światła białego	33
3.1. Koncepcja rekonstrukcji zespolonego, barwnego obiektu.....	33
3.2. Budowa systemu wyświetlacza.....	34
3.3. Budowa maski barwnej.....	35
3.4. Kodowanie i dekodowanie zespolonego frontu falowego	36
3.5. Metoda generacji zespolonego hologramu światła białego	39
3.6. Metoda kalibracji położenia maski barwnej	42
3.7. Wydajność dyfrakcyjna zaproponowanej metody	44
3.8. Balans bieli.....	45
3.9. Efekt wyciekania barw	46
3.10. Optyczne rekonstrukcje obiektów 2D i 3D.....	47
3.11. Dyskusja wpływu koherencji źródła światła na jakość obrazowania w systemie wyświetlacza	50
3.12. Podsumowanie	51

4. Barwny wyświetlacz holograficzny z oknem obserwacji i oświetleniem niekoherentnym.....	52
4.1. Koncepcja holograficznego obrazowania Fouriera.....	53
4.2. Budowa wyświetlacza holograficznego z oknem obserwacji i oświetleniem niekoherentnym	56
4.3. Metoda generacji hologramu	57
4.4. Optyczne rekonstrukcje rzeczywistego obiektu 3D.....	59
4.5. Deformacje zrekonstruowanego przedmiotu 3D	61
4.6. Analiza wpływu koherencji przestrzennej źródła światła na rozdzielczość i głębię rekonstrukcji	63
4.6. Podsumowanie	66
5. Tęczowy wyświetlacz holograficzny z rozszerzonym kątem pola widzenia.....	68
5.1. Koncepcja tęczowego wyświetlacza holograficznego.....	70
5.2. Budowa tęczowego wyświetlacza holograficznego.....	71
5.3. Metoda generacji cyfrowych hologramów tęczowych	72
5.4. Optyczne rekonstrukcje rzeczywistego obiektu 3D.....	74
5.5. Analiza zwiększonego pola obserwacji	75
5.6. Właściwości spektralne obserwowanych obrazów	78
5.7. Wpływ wymiaru szczeliny na rozdzielczość i głębię rekonstrukcji	82
5.8. Podsumowanie	84
6. Barwny wyświetlacz holograficzny z binarnym modulatorem DMD i oświetleniem niekoherentnym.....	86
6.1. Właściwości dyfrakcyjne modulatora DMD.....	87
6.2. Budowa wyświetlacza holograficznego z modulatorem DMD i niekoherentnym źródłem LED.....	90
6.3. Metoda generacji hologramu binarnego	91
6.4. Optyczne rekonstrukcje obiektów 2D.....	95

6.5. Koncepcja wyświetlacza holograficznego z korekcją dyspersji modulatora DMD	97
6.6. Modyfikacja barwnego wyświetlacza holograficznego z panelem DMD i niekoherentnym źródłem światła umożliwiającą korekcję dyspersji modulatora	99
6.7. Analiza korekcji dyspersji trzech barwnych komponentów	100
6.8. Redukcja szumu plamkowego z zastosowaniem niekoherentnego źródła światła	103
6.9. Optyczne rekonstrukcje rzeczywistego obiektu 3D.....	104
6.10. Podsumowanie	106
7. Podsumowanie rozprawy i kierunki dalszych prac	107
7.1. Podsumowanie rozprawy	107
7.2. Elementy nowości w rozprawie oraz kierunki dalszych prac	108
Bibliografia	110

1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie

Holografia jest techniką umożliwiającą rekonstrukcję trójwymiarowych obiektów [1]. Jej podstawy teoretyczne opracowane i opisane zostały przez Denisa Gabora w latach 1948 - 1951. Obrazowanie realizowane jest w niej w dwóch etapach. W pierwszym rejestrowany jest interferogram, nazywany hologramem. Powstaje on w wyniku nakładania się na siebie wiązki przedmiotowej oraz wiązki referencyjnej. W hologramie zakodowana jest amplituda zespolona obiektu, czyli jego amplituda i faza. Pierwsza zmienna niesie informację o intensywności przedmiotu, a druga o jego głębi. W drugim etapie hologram oświetlany jest wiązką sprzężoną do wiązki referencyjnej. W rezultacie, w płaszczyźnie rekonstrukcji, powstaje trójwymiarowy obraz zarejestrowanego przedmiotu. Oba etapy są od siebie niezależne i mogą być rozdzielone. Zalety holografii optycznej sprawiają, że jest ona chętnie stosowana między innymi w: rejestracji obiektów dziedzictwa kulturowego, interferometrii, mikroskopii, tworzeniu zabezpieczeń, diagnostyce medycznej.

W holografii analogowej interferogram rejestrowany jest na materiale światłoczułym o wysokiej rozdzielczości. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie rekonstrukcji przedmiotu o praktycznie dowolnym rozmiarze oraz szerokim kącie pola widzenia. Odtworzony wysokiej jakości obraz może być obserwowany tak samo jak ma to miejsce w rzeczywistości, z pełną głębią i paralaksą. Wymienione zalety sprawiają, że cyfrowe wyświetlacze holograficzne z pewnością zrewolucjonizowałyby rynek wyświetlaczy 3D. Ciągły rozwój technologii wytwarzania urządzeń wykorzystywanych do rejestracji i rekonstrukcji zespolonego frontu falowego sprawia, że odtworzenie realistycznego przedmiotu z zastosowaniem tej techniki staje się obecnie coraz bardziej realne [2].

Hologram cyfrowy może być zarejestrowany za pomocą kamery [3 - 5] lub wygenerowany komputerowo [6 - 8]. W pierwszym przypadku wymiar hologramu ograniczony jest przez wymiar pikseli kamery oraz ich liczbę. Istnieją jednak techniki, które pozwalają na jego zwiększenie poprzez zastosowanie wielu urządzeń rejestrujących [9] lub zapis wielu hologramów w sekwencji czasu [10]. W drugim przypadku problem ten nie istnieje. Ograniczenie metody stanowią jedynie moce obliczeniowe współczesnych komputerów. W literaturze znaleźć można szereg algorytmów umożliwiających utworzenie dużego hologramu skomplikowanego obiektu w czasie rzeczywistym [11 - 13].

Przedmiot 3D może być odtworzony z zarejestrowanego hologramu cyfrowego z wykorzystaniem rekonstrukcji numerycznej lub optoelektronicznej. Pierwsza realizowana jest komputerowo poprzez implementację odpowiednich algorytmów propagacji. Druga wykonywana jest optycznie, poprzez wyświetlenie hologramu cyfrowego na urządzeniu umożliwiającym modulację amplitudy lub fazy padającej na niego wiązki światła. Element posiadający taką funkcjonalność nazywany jest przestrzennym modulatorem światła SLM (ang. *spatial light modulator*). Wyróżnić można dwa główne typy szeroko stosowanych paneli SLM w cyfrowych wyświetlaczach holograficznych. Pierwszy zbudowany jest z ciekłych kryształów, które obracają się pod wpływem przyłożonego napięcia [14, 15]. Wraz ze zmianą kąta nachylenia zmienia się ich współczynnik załamania. Dzięki temu możliwa jest kontrola drogi optycznej przechodzącego przez nie światła. Urządzenia te umożliwiają uzyskanie 8 bitowej modulacji amplitudy lub fazy. Optyczną rekonstrukcję holograficzną otrzymywaną z wykorzystaniem fazowego urządzenia SLM charakteryzuje wysoka jakość oraz wydajność dyfrakcyjna. Drugi typ modulatora, tzw. DMD (ang. *digital micromirror device*), zbudowany jest z matrycy mikrozwierciadeł [16]. Każde z nich może przyjąć dwie pozycje katowe $+12^\circ$ lub -12° . Odpowiadają one stanom „0” i „1” modulowanego sygnału. Dlatego DMD umożliwia 1 bitową modulację amplitudy. W efekcie optyczne rekonstrukcje uzyskiwane z jego wykorzystaniem charakteryzuje obniżona jakość. Mimo to panel DMD jest często wybierany do budowy wyświetlaczy holograficznych, ponieważ charakteryzuje go bardzo wysoka częstotliwość odświeżania obrazu.

Cyfrowy wyświetlacz holograficzny powinien zapewniać atrakcyjną rekonstrukcję barwnego przedmiotu 3D, który może być obserwowany z wielu kierunków. W tym celu modulator musi odtworzyć ogromną ilość informacji. Mimo nieustannego rozwoju technologii wytwarzania tych urządzeń ich parametry (wymiar i liczba pikseli) są wciąż niewystarczające do zrealizowania tego zadania. W praktyce wymiar obrazu generowany przez modulator i kąt, pod którym jest on widoczny, są zbyt małe by uzyskać rekonstrukcję spełniającą oczekiwania użytkowników. Z tego powodu w holografii cyfrowej szeroko rozwijane są techniki, które pozwalają zwiększyć SBP (ang. *space bandwidth product*) wyświetlacza i w konsekwencji uzyskać atrakcyjny obraz.

Przykładem prac dążących do przezwyciężenia ograniczeń wynikających z niewystarczających parametrów komercyjnie dostępnych modulatorów SLM jest praca doktorska Grzegorza Finke obroniona w 2016 roku. Autor przedstawia w niej wyświetlacz holograficzny pozwalający na uzyskanie zwiększonego rozmiaru przedmiotu lub kąta pola

widzenia [17]. W rozwiązaniu tym wymiary obiektu są wciąż zbyt małe by można było uznać go za atrakcyjny. Dodatkowo wyświetlacz zapewnia jedynie monochromatyczne rekonstrukcje. Przedstawiony układ zbudowany jest z zastosowaniem koherentnego źródła światła w postaci lasera. Wynika to z możliwości rekonstrukcji obiektów o praktycznie nieskończonej głębi oraz najwyższej rozdzielczości. Koherentne oświetlenie powoduje jednak powstawanie wysokokontrastowego szumu plamkowego, który obniża jakość obrazu. Dodatkowo laser stanowi zagrożenie dla oczu użytkownika. Z tych powodów zastosowanie koherentnego źródła światła w wyświetlaczach holograficznych, które miałyby być dostępne do użytku powszechnego, jest ograniczone. Najprostszym i najlepszym rozwiązaniem tego problemu jest zastąpienie lasera niekoherentnym oświetleniem w postaci diody LED.

Wymienione czynniki sprawiły, że postanowiłem podjąć się zadania opracowania i budowy systemu barwnego wyświetlacza holograficznego z oświetleniem niekoherentnym, który zapewnia atrakcyjną rekonstrukcję przedmiotu trójwymiarowego oraz umożliwia jego obserwację gołym okiem w zwiększonym kącie pola widzenia.

1.2. Cel pracy

Głównym celem pracy jest opracowanie, budowa oraz analiza systemu barwnego wyświetlacza holograficznego o szerokim kącie pola widzenia z oświetleniem niekoherentnym, który umożliwia uzyskanie obrazu przedmiotu 3D. System powinien zapewniać:

- rekonstrukcję amplitudy zespolonej;
- możliwość odtworzenia dużych, barwnych obrazów 2D i 3D o wysokiej jakości rekonstrukcji;
- obserwację całych obiektów gołym okiem;
- rekonstrukcję hologramów cyfrowych obiektów rzeczywistych oraz hologramów generowanych komputerowo;
- szeroki kąt pola widzenia;
- możliwość stosowania fazowych i binarnych przestrzennych modulatorów światła.

Spełnienie wyżej wymienionych zadań wymaga opracowania i implementacji szeregu rozwiązań konstrukcyjnych oraz algorytmicznych. W pierwszej grupie najważniejszym celem jest opracowanie i implementacja nowatorskich konstrukcji układów wyświetlaczy wykorzystujących oświetlenie niekoherentne. W drugiej konieczne jest stworzenie nowych metod, które pozwalają na ich efektywną realizację. Spełnienie zadań postawionych w pracy

powinno być potwierdzone poprzez otrzymanie wysokiej jakości rekonstrukcji przedmiotów 3D, które mogą być obserwowane gołym okiem.

1.3. Struktura pracy

Rozprawa doktorska składa się z siedmiu rozdziałów. Rozdział 1 zawiera wprowadzenie do podjętej tematyki badań w zakresie budowy cyfrowych wyświetlaczy holograficznych. Zdefiniowany jest w nim cel podjętej pracy oraz przedstawiona jest struktura dysertacji.

W rozdziale 2 zamieszczony jest krótki przegląd rozwiązań opisanych w literaturze, które umożliwiają: odtworzenie barwy przedmiotu, zwiększenie rozmiaru obiektu, zwiększenie kąta pola widzenia, rekonstrukcję obrazu z wykorzystaniem niekoherentnego źródła światła oraz uzyskanie zespolonego frontu falowego z zastosowaniem komercyjnie dostępnych modulatorów SLM.

Rozdział 3 przedstawia opracowany w pracy barwny wyświetlacz holograficzny z pojedynczym, fazowym modulatorem SLM, diodą światła białego oraz maską barwną. Znajduje się w nim opis zbudowanego układu wraz ze specyfikacją wykorzystanych elementów oraz procedurą ich kalibracji. W tym fragmencie rozprawy omówiony jest nowy algorytm, który umożliwia zakodowanie barwy przedmiotu 3D w pojedynczym, zespolonym hologramie światła białego. Przedstawione rozwiązanie przebadane jest eksperymentalnie pod kątem wydajności oraz jakości otrzymywanych optycznych rekonstrukcji.

W rozdziale 4 znajduje się opis koncepcji i budowy opracowanego wyświetlacza holograficznego z oknem obserwacji i oświetleniem niekoherentnym. Zapewnia on rekonstrukcję dużych, barwnych rzeczywistych przedmiotów 3D, które mogą być obserwowane gołym okiem. W tej części pracy omówiona jest ścieżka przetwarzania pozwalająca na odtworzenie obiektu w dowolnym położeniu i z dowolnym powiększeniem. Zamieszczone w nim wyniki optycznych rekonstrukcji stanowią weryfikację zaproponowanej metody. Dodatkowo w rozdziale znajduje się analiza wpływu koherencji przestrzennej źródła światła na rozdzielczość i głębię rekonstrukcji uzyskiwaną w wyświetlaczu.

W rozdziale 5 omówione jest zaproponowane w rozprawie rozwiązanie, które umożliwia rozszerzenie kąta pola widzenia odtworzonego przedmiotu. Przedstawiona jest w nim koncepcja i budowa systemu tęczowego wyświetlacza holograficznego. Następnie zamieszczony jest opis metody generacji hologramu. W rozdziale znajduje się analiza powstawania zwiększonego okna obserwacji. Zademonstrowane są w nim właściwości

spektralne obserwowanych obrazów oraz wpływ wymiaru szczeliny nakładanej na hologram tęczowy na jakość i głębię rekonstruowanych przedmiotów.

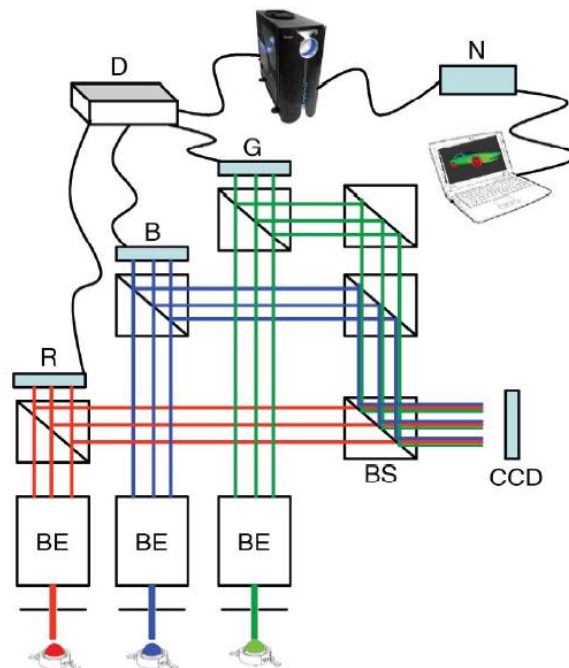
Rozdział 6 bada możliwość zastosowania oświetlenia niekoherentnego i modulatora DMD do budowy wyświetlacza holograficznego. W jego pierwszej części analizowane są właściwości dyfrakcyjne panelu DMD oraz przeprowadzone są rozważania teoretyczne dyspersji urządzenia oświetlonego diodą LED. Następnie eksperymentalnie udowodniony jest dominujący wpływ ograniczonej koherencji czasowej źródła na jakość rekonstrukcji uzyskiwanej z modulatorem DMD. W drugiej części rozdziału przedstawione jest rozwiązanie umożliwiające korekcję dyspersji DMD z zastosowaniem siatki dyfrakcyjnej umieszczonej w module oświetlającym wyświetlacza. Omówiona jest w niej budowa zaproponowanego systemu oraz przedstawione są jego parametry. Zamieszczone w rozdziale wyniki optycznych rekonstrukcji stanowią weryfikację opracowanej metody.

Ostatni rozdział zawiera podsumowanie i wnioski z przeprowadzonych prac oraz wytyczne do dalszych kierunków badań. Na końcu rozprawy doktorskiej zamieszczony został spis bibliograficzny.

2. Przegląd literatury

2.1. Metody rekonstrukcji barwy

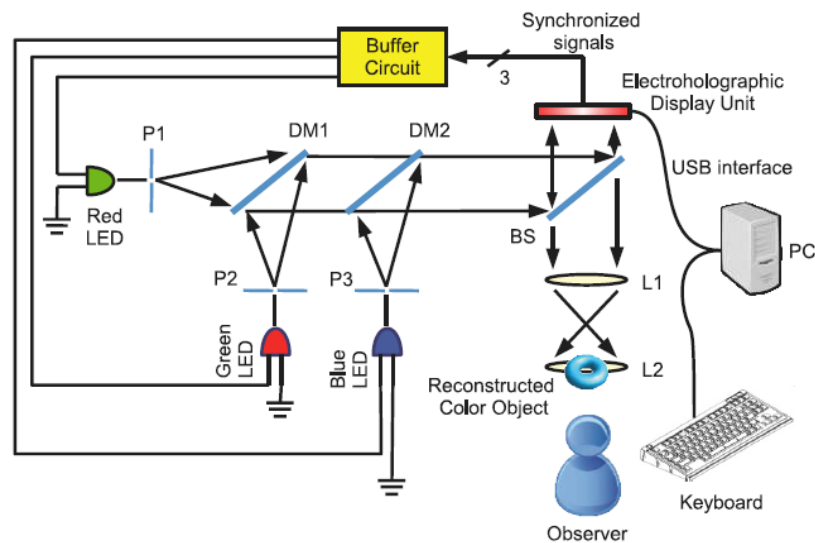
Rekonstrukcja barwy obiektu 3D w wyświetlaczu holograficznym stanowi istotny problemem badawczy, który adresowany jest w licznych publikacjach. Najczęściej realizowana jest ona przez nałożenie na siebie składowych obrazów czerwonego, zielonego i niebieskiego (ang. *red, green, blue* – RGB) rozpatrywanego obiektu. Jedną z metod przedstawionych w literaturze umożliwia odtworzenie barwy z wykorzystaniem trzech modulatorów SLM i trzech źródeł RGB [18 - 21]. Technika zilustrowana jest schematycznie na Rys. 2-1. W rozwiązaniu tym każdy modulator adresowany jest przez hologram wygenerowany dla innej, pojedynczej składowej RGB przedmiotu. Następnie jest on oświetlany przez wiązkę o odpowiadającej mu długości fali. Wiązki przedmiotowe komponentów RGB propagują się różnymi torami optycznymi. Dzięki zastosowaniu dzielników wiązki oraz zwierciadeł możliwe jest nałożenie ich na siebie w płaszczyźnie rekonstrukcji, w której powstaje barwny obraz.



Rys. 2-1. Schemat barwnego wyświetlacza z trzema modulatorami SLM i źródłami światła RGB [18]. Oznaczenia na rysunku: *BE* – układ rozszerzania wiązki; *R, G, B* – modulatory SLM wyświetlające składowe hologramy RGB; *BS* – dzielnik wiązki.

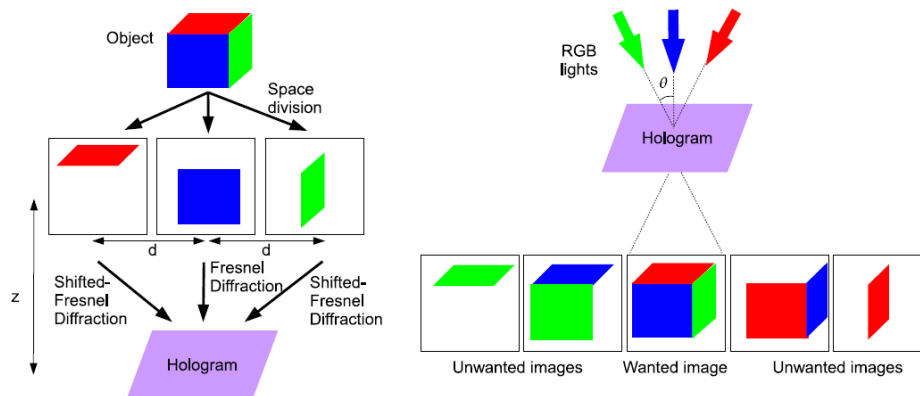
Poza rozwiązaniami z trzema modulatorami szeroko rozwijane są metody rekonstrukcji barwy z użyciem pojedynczego urządzenia SLM. Wśród nich wyróżnić można technikę multipleksingu czasowego [22 - 26], multipleksingu przestrzennego [27 - 30] oraz rozwiązanie wykorzystujące urządzenia o modulacji fazowej będącej wielokrotnością 2π [31]. Pierwsze

podejście zostało schematycznie przedstawione na Rys. 2-2. W metodzie tej modulator SLM wyświetla w sekwencji czasu hologramy utworzone dla składowych komponentów RGB obiektu. Jest on zsynchronizowany z trzema źródłami światła RGB. Każde z nich włączone jest tylko wtedy, gdy modulator adresowany jest składowym hologramem o odpowiadającej mu barwie. Suma rekonstrukcji tworzy pojedynczy obraz przedmiotu. Multipleksing czasowy zapewnia wysoką jakość odtworzonego obiektu. W celu uniknięcia powstawania bardzo niekorzystnego efektu migotania obrazu wymagane jest wykorzystanie modulatorów pracujących z wysoką częstotliwością.



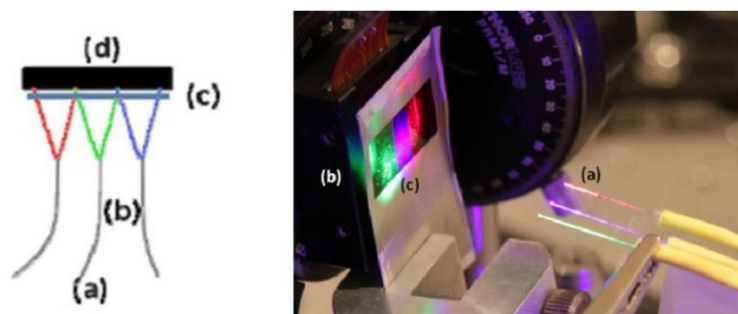
Rys. 2-2. Schemat barwnego wyświetlacza holograficznego z wykorzystaniem pojedynczego modulatora SLM i metody multipleksingu czasowego [24]. Oznaczenia na rysunku: *Electroholographic Display Unit* – modulator SLM; *DM1*, *DM2*, *BS* – elementy światłdzielące; *Synchronized signals* – sygnał synchronizujący; *Reconstructed Color Object* – barwny obraz.

Innym rozwiązaniem jest zastosowanie techniki multipleksingu przestrzennego [27, 28], której koncepcja pokazana jest schematycznie na Rys. 2-3. W metodzie tej obiekt barwny dzielony jest na składowe RGB, które przesuwane są względem siebie poprzecznie tak, aby rekonstruować się w jednej przestrzeni. Wszystkie komponenty kodowane są w pojedynczym hologramie. Następnie jest on oświetlony przez wiązki RGB o różnych kątach padania, w tym samym momencie. Technika ta powoduje powstawanie dodatkowych, niepożądanych kopii obiektu w płaszczyźnie obrazowej. Są one jednak poprzecznie odseparowane od prawidłowej, barwnej rekonstrukcji przedmiotu. Rozwiązanie charakteryzuje zmniejszony rozmiar odtworzonego obiektu.



Rys. 2-3. Schemat metody rejestracji (po lewej) oraz rekonstrukcji (po prawej) barwnego przedmiotu z wykorzystaniem pojedynczego modulatora SLM i techniki multipleksingu przestrzennego [28]. Oznaczenia na rysunku: *Object* - przedmiot; *Fresnel Diffraction* – dyfrakcja Fresnela, *Shifted Fresnel Diffraction* – dyfrakcja Fresnela dla przesuniętego przedmiotu; *RGB lights* – źródła RGB; *Unwanted images* – niepożądane obrazy; *Wanted image* – prawidłowy obraz.

Modyfikacją metody, umożliwiającą podniesienie jakości rekonstruowanego obrazu oraz zwiększenie jego rozmiaru, jest technika wykorzystująca podział apertury modulatora na trzy równe części [29, 30]. Każda z nich adresowana jest przez inny składowy hologram RGB. W układzie rekonstrukcji, przedstawionym na Rys. 2-4, przed powierzchnią modulatora umieszczone są trzy laserowe źródła światła RGB. Każde z nich oświetla inną część urządzenia w tym samym momencie. Przed panelem SLM zlokalizowana jest maska barwna złożona z filtrów spektralnych RGB, które przepuszczają tylko wybraną długość fali. W rezultacie każdy składowy hologram RGB oświetlony jest przez wiązkę światła o odpowiadającej mu barwie. Technika umożliwia budowę kompaktowego systemu barwnej projekcji holograficznej [30]. Ze względu na podział apertury hologramu rozdzielczość rekonstrukcji jest w niej trzykrotnie zmniejszona.



Rys. 2-4. Schemat podziału powierzchni modulatora SLM (po lewej) oraz zdjęcie układu rekonstrukcji (po prawej) [30]. Oznaczenia na rysunku: (a) źródła RGB, (b) światłowody, (c) maska RGB, (d) SLM.

Kolejną metodą pozwalającą na rekonstrukcję barwy jest wykorzystanie pełnego zakresu modulacji fazy modulatora [31]. Realizowana jest ona z użyciem urządzenia SLM, które umożliwia uzyskanie przesunięcia fazy w zakresie między 0 a 10π . W podejściu tym każda składowa barwa RGB przedmiotu kodowana jest w hologramie o modulacji 2π . Następnie tworzony jest wielopoziomowy interferogram o zakresie modulacji przekraczającej kilka wielokrotności 2π . Rozwiązanie pozwala na rekonstrukcję barwy z wykorzystaniem pojedynczego hologramu. Charakteryzuje się ono niedużymi błędami odtworzenia fazy i wyciekaniem barw poniżej 5 %.

2.2. Metody zwiększenia rozmiaru przedmiotu i kąta pola widzenia

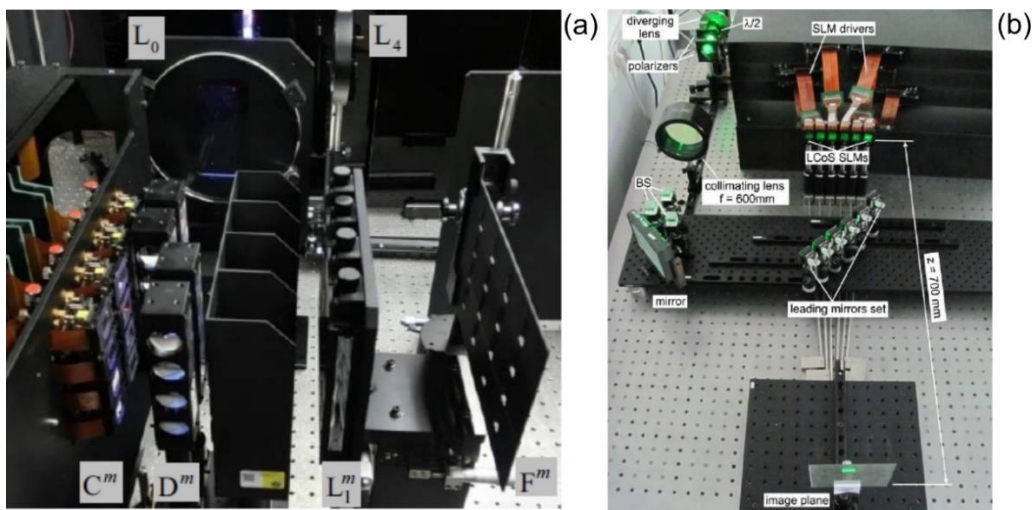
W wyświetlaczu holograficznym wymiary odtworzonego obiektu oraz kąt, pod którym może być on obserwowany są ściśle związane z parametrami użytego modulatora SLM. Technologia wytwarzania tych urządzeń nieustannie się rozwija o czym świadczą ich coraz wyższe rozdzielczości i częstotliwości odświeżania obrazu oraz mniejsze wymiary piksela. Jednak wszystkie komercyjnie dostępne modulatory nie pozwalają na uzyskanie rekonstrukcji wystarczająco dużego obrazu 3D i szerokiego kąta pola widzenia, żeby spełniał on oczekiwania użytkowników. Z tego powodu znacząca część prac naukowych z zakresu wyświetlaczy holograficznych dotyczy metod pozwalających zwiększyć ilość informacji SBP, która może być przez nie odtworzona.

Bezpośrednim sposobem zwiększenia SBP wyświetlacza jest budowa modulatora SLM o większej liczbie i mniejszym wymiarze pikseli. Wymaga to jednak opracowania kompletnego łańcucha technologicznego, który uwzględniać musi wytwarzanie urządzenia, transmisję dużej ilości danych, ich przetwarzanie i przechowywanie. Przykład badań mających na celu konstrukcję dużego modulatora SLM znaleźć można w pracy [32]. Autorzy przedstawiają urządzenie o rozdzielczości 15600×3200 i wymiarze piksela $3 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$. Ze względu na produkcję jednostkową koszt wytworzenia takiego modulatora jest bardzo wysoki.

Inną metodą pozwalającą zwiększyć SBP wyświetlacza jest wykorzystanie wielu komercyjnie dostępnych modulatorów SLM. W rozwiązaniu tym wyróżnić można dwie podstawowe konfiguracje układów: płaską [33, 34] i sferyczną [35 - 37]. Pierwsza wykorzystuje dwuwymiarową matrycę modulatorów. Ustawienie wielu paneli w tej samej płaszczyźnie, jeden obok drugiego, umożliwia zwiększenie rozmiaru rekonstruowanego obiektu. W pracy [33] przedstawiony jest system wyświetlacza holograficznego złożonego z macierzy 2×5 modulatorów. Każdy z nich odtwarza inny fragment przedmiotu o wymiarach $10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$. W płaszczyźnie rekonstrukcji części składowe łączą się ze sobą tworząc duży

obraz ($20 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$). Podobne rozwiązanie zaprezentowane zostało w referencji [34]. Autorzy artykułu demonstrują układ zbudowany z kwadratowej macierzy 4×4 modulatorów, każdy o rozdzielczości 4K. Rekonstruuje on obraz o przekątnej równej 85 mm. Zdjęcie części obrazującej wyświetlacza przedstawione jest na Rys. 2-5(a).

Konfiguracja sferyczna wykorzystuje wiele pochyłonych względem siebie modulatorów ułożonych na bazie okręgu. W tym przypadku każde urządzenie wyświetla hologram wygenerowany dla innego widoku przedmiotu. Wszystkie składowe rekonstrukcje rekombinują ze sobą w płaszczyźnie powstawania obrazu. Dzięki temu możliwe jest zwiększenie kąta pola widzenia wyświetlacza. W artykule [35] przedstawiony jest układ zbudowany z 12 modulatorów, który pozwala na uzyskanie kąta pola widzenia równego $22,8^\circ$. Rozwiązanie zaprezentowane w pracy [36] wykorzystuje 9 urządzeń tworzących rekonstrukcję, która może być obserwowana w zakresie 24° . Inny układ wyświetlacza, zademonstrowany w referencji [37], składa się z 6 modulatorów. Zapewnia on kąt pola widzenia 12° . Zdjęcie systemu umieszczone jest na Rys. 2-5(b).

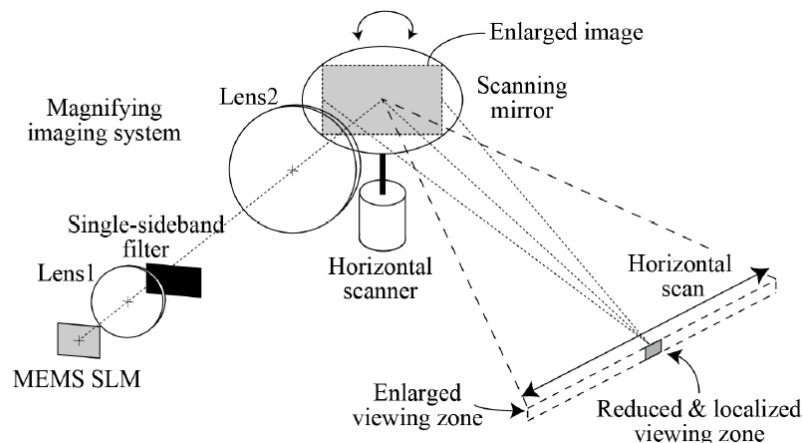


Rys. 2-5. Układ wyświetlacza holograficznego z wieloma modulatorami SLM umieszczonymi w konfiguracji (a) płaskiej [34], (b) sferycznej [37]. Oznaczenia na rysunku: (a) C^m – matryca modulatorów SLM; D^m – dzielniki wiązki; L_m^l – matryca mikrosoczewek; F^m – matryca filtrów przestrzennych; (b) *leading mirrors set* – zestaw zwierciadeł tworzących oświetlenie modulatorów SLM; *SLM drivers* – sterowniki modulatorów; *LCoS SLMs* – panele SLM; *image plane* – płaszczyzna obrazu.

We wszystkich wymienionych wyświetlaczach holograficznych, zbudowanych w konfiguracji sferycznej, rekonstruowany jest monochromatyczny obraz. W pracy [38] zaprezentowana jest modyfikacja układu z artykułu [37] pozwalająca na rekonstrukcję barwy. Wykorzystuje ona metodę podziału apertury modulatora, która opisana jest w rozdziale 2.1. We wszystkich omówionych systemach zwiększenie SBP jest proporcjonalne do liczby

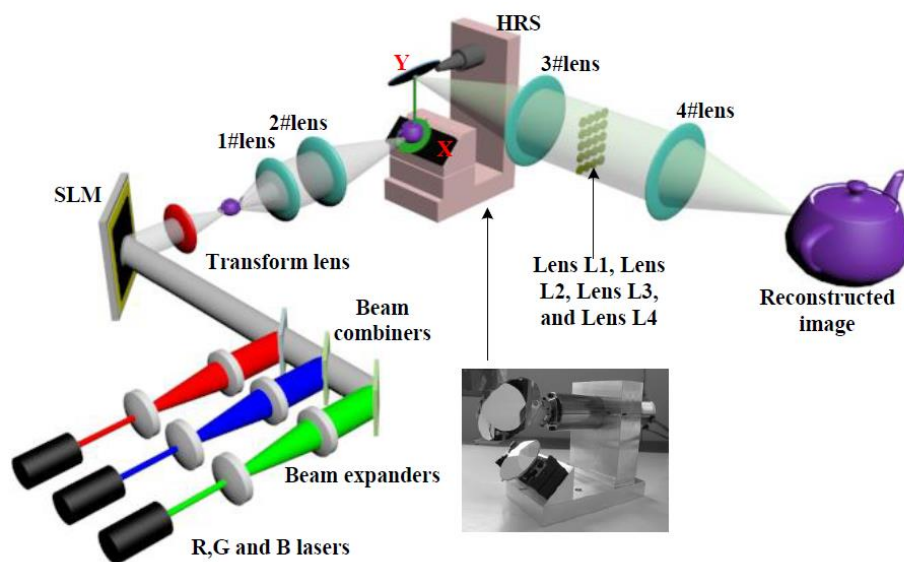
wykorzystanych paneli SLM. Problemem wymienionych technik jest powstawanie brakujących fragmentów obrazu, spowodowanych przerwami między modulatorami. Odstępy te wynikają z konstrukcji matryc SLM, które umieszczone są w ramce uniemożliwiającej ustawienie ich dostatecznie blisko siebie. Efekt ten minimalizowany jest z zastosowaniem elementów optycznych lub dodatkowego modulatora.

Kolejna grupa rozwiązań bazuje na metodzie multipleksingu czasowego. Wykorzystuje ona urządzenia SLM o wysokiej częstotliwości odświeżania obrazu oraz elementy skanujące w jednym lub dwóch kierunkach [39 – 42]. Rozwiązania te pozwalają na uzyskanie dużego przyrostu SBP. Jedną z metod wykorzystuje pojedynczy modulator DMD pracujący z częstotliwością 13,3 kHz oraz zwierciadło skanujące w kierunku poziomym [39]. Schemat układu zilustrowany jest na Rys. 2-6. W przedstawionym rozwiązaniu modulator DMD oświetlony jest falą płaską. Za panelem znajduje się układ obrazujący złożony z dwóch soczewek o różnych ogniskowych. Tworzy on powiększoną kopię przedmiotu. W płaszczyźnie powstawania obrazu umieszczone jest zwierciadło, które skupia wiązkę obiektową w swoim ognisku. Takie rozwiązanie pozwala na zobaczenie całego obiektu, gdy oko użytkownika umieszczone jest w ograniczonej przestrzeni obserwacji. Ruch obrotowy zwierciadła wokół osi pionowej powoduje jej rozszerzenie. Szerokość pola obserwacji w zademonstrowanym wyświetlaczu wynosi 437 mm. Tworzone jest ono na odległości 600 mm od obrazu modulatora DMD.



Rys. 2-6. Układ wyświetlacza holograficznego z pojedynczym modulatorem światła oraz zwierciadłem skanującym w kierunku poziomym [39]. Oznaczenia na rysunku: *lens1*, *lens2* - soczewka 1 i 2; *Enlarged image* – powiększony obraz; *scanning mirror* – zwierciadło skanujące; *Reduced & localized viewing zone* – ograniczona przestrzeń obserwacji; *enlarged viewing zone* – zwiększone pole obserwacji.

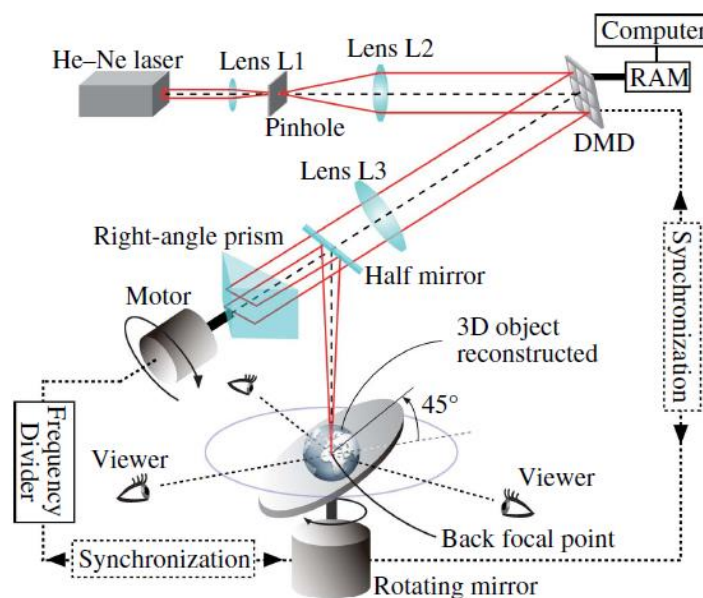
W referencji [40] przedstawiony jest wyświetlacz holograficzny z modulatorem DMD i techniką skanowania w obu kierunkach. Schemat układu znajduje się na Rys. 2-7. Modulator DMD pracujący z częstotliwością 22,7 kHz oświetlony jest przez trzy laserowe źródła RGB. Światło odbite od jego matrycy pada na soczewkę realizującą transformatę Fouriera. Tworzy ona obraz przedmiotu, który powiększany jest za pomocą układu 4F złożonego z dwóch soczewek. W płaszczyźnie ogniskowej drugiej soczewki znajduje się element skanujący HRS. Zbudowany jest on z urządzenia oscylującego sterowanego elektrycznie (kierunek poziomy) oraz zwierciadła galwanometrycznego (kierunek pionowy). Dla każdego położenia elementów skanujących na modulatorze wyświetlany jest hologram przedmiotu, który wygenerowany jest dla innego kierunku obserwacji. Pojedyncze widoki, tworzone w ognisku soczewki znajdującej się za HRS, układane są w macierz 2D. Kolejny układ 4F złożony z dwóch soczewek umożliwia połączenie składowych obrazów i utworzenie rekonstrukcji obiektu, który może być obserwowany w kącie pola widzenia równym 48° , w obu kierunkach.



Rys. 2-7. Schemat wyświetlacza holograficznego z pojedynczym modulatorem DMD i układem skanującym w dwóch kierunkach [40]. Oznaczenia na rysunku: *RGB lasers* – laserowe źródła RGB; *SLM* – modulator DMD; *Transform lens* – soczewka; *1#lens 2#lens* – pierwszy układ obrazujący 4F; *HRS* – urządzenie skanujące w obu kierunkach; *3#lens 4#lens* – drugi układ 4F; *Reconstructed image* – zrekonstruowany obraz.

Wśród omawianej grupy interesujące są rozwiązania umożliwiające uzyskanie rekonstrukcji holograficznej, która widziana jest w kącie 360° [41, 42]. Metody wykorzystują binarny modulator DMD o wysokiej częstotliwości odświeżania obrazu. Pierwsze rozwiązanie zrealizowane jest z wykorzystaniem pojedynczego panelu DMD oraz zwierciadła skanującego

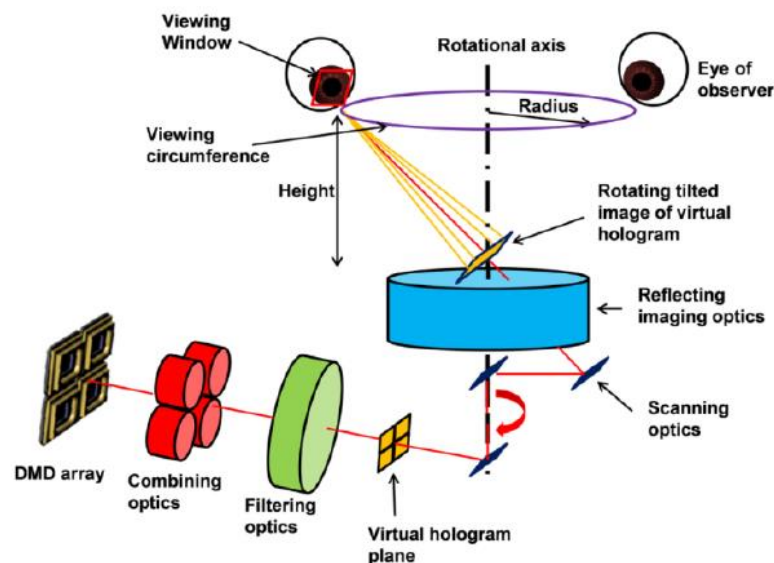
umieszczonego pod kątem 45° względem osi poziomej [41]. Schematyczna ilustracja systemu wyświetlacza zamieszczona jest na Rys. 2-8. W przedstawionym układzie płaszczyzna DMD oświetlona jest koherentną falą płaską. Za modulatorem umieszczona jest soczewka realizująca transformatę Fouriera. Tworzy ona, w swoim ognisku, rzeczywisty obraz obiektu 3D. W płaszczyźnie rekonstrukcji umieszczone jest pochylone zwierciadło. Obraca się ono wokół osi pionowej z częstotliwością 10 Hz, zapewniając pełny kąt pola widzenia przedmiotu w kierunku poziomym. Zwierciadło zsynchronizowane jest z modulatorem DMD, który adresowany jest w sekwencji czasu przez hologramy wygenerowane dla różnych widoków przedmiotu. Podczas ruchu elementu skanującego obraca się również powstały obraz. Efekt ten niwelowany jest przez zastosowanie pryzmatu prostokątnego, którego kąt pochyłu zmienia się wraz z ruchem zwierciadła.



Rys. 2-8. Schemat układu wyświetlacza holograficznego z wykorzystaniem pojedynczego modulatora DMD i pochylonego zwierciadła skanującego, który pozwala na obserwację obiektu w pełnym kącie pola widzenia [41]. Oznaczenia na rysunku: *Lens L2* – soczewka kolimująca; *Lens L3* – soczewka realizująca transformatę Fouriera; *Half mirror* – dzielnik wiązki; *Right-angle prism* – pryzmat prostokątny; *3D object reconstructed* – zrekonstruowany obiekt 3D; *back focal point* – płaszczyzna ogniskowa soczewki L3; *Rotating mirror* – zwierciadło obrotowe.

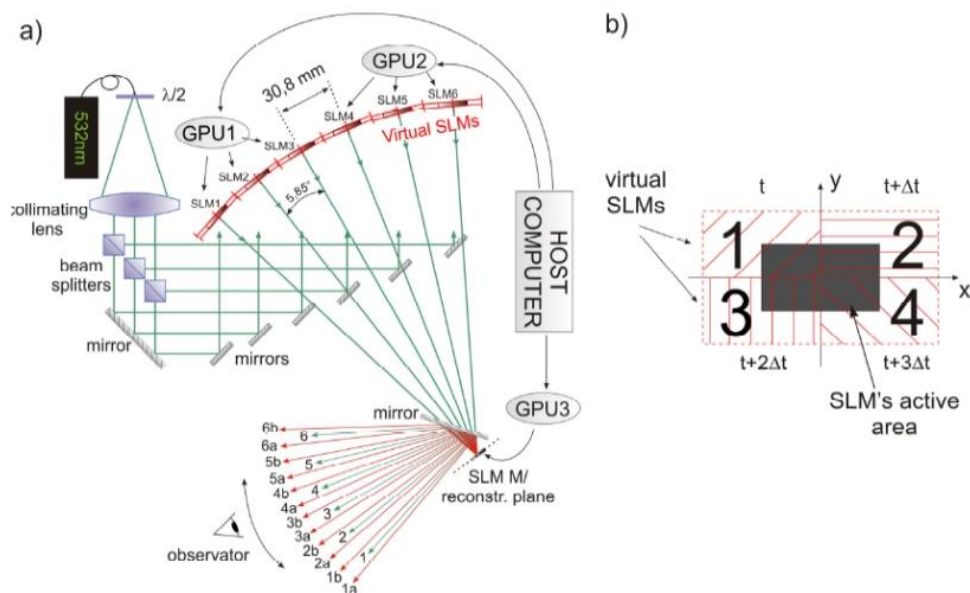
W referencji [42] zaprezentowany jest inny układ wyświetlacza holograficznego z pełnym kątem pola widzenia. Zbudowany jest on w konfiguracji Fresnela. Schemat systemu przedstawiony jest na Rys. 2-9. Zrealizowany jest on z wykorzystaniem multipleksingu czasowego i przestrzennego. Rekonstrukcja holograficzna uzyskiwana jest w nim z wykorzystaniem macierzy 2×2 modulatorów DMD. Są one oświetlone przez koherentną falę

płaską. Wiązka odbita od DMD przechodzi przez układ obrazujący 4F o powiększeniu równym 1,67. W jego płaszczyźnie wyjściowej tworzone są cztery, ułożone w macierz 2×2 , zespolone obrazy składające się w jedną rekonstrukcję. Za nią umieszczony jest układ skanujący złożony z dwóch obrotowych zwierciadeł. Są one zsynchronizowane z modulatorem DMD, który wyświetla hologramy wygenerowane dla różnych widoków przedmiotu. Zwierciadła pozwalają na uzyskanie pełnego kąta pola widzenia przedmiotu w kierunku poziomym. Za elementem skanującym umieszczony jest system obrazujący. Zbudowany jest on z soczewki asferycznej oraz dwóch zwierciadeł parabolicznych. Pierwszy element tworzy okno obserwacji na wyjściu układu. Gdy obserwator umieści w nim źrenicę oka, może zobaczyć cały odtworzony obiekt. Natomiast dwa zwierciadła paraboliczne wprowadzają powiększenie obrazu równe 1,65. Dodatkowo pozwalają one na zwiększenie atrakcyjności rekonstrukcji, ponieważ użytkownik ma wrażenie, jakby obserwowany obraz unosił się nad ich powierzchnią. Kąt obserwacji 360° uzyskiwany jest z wykorzystaniem 628 obróconych względem siebie rekonstrukcji. Częstotliwość odświeżania obrazu w wyświetlaczu wynosi 20 ramek na sekundę. Obserwowany przedmiot ma wymiar około 80 mm.



Rys. 2-9. Schemat układu wyświetlacza z macierzą modulatorów DMD oraz systemem skanującym, który umożliwi uzyskanie rekonstrukcji w pełnym kącie pola widzenia [42]. Oznaczenia na rysunku: *DMD array* – macierz modulatorów DMD; *Combining optics*, *Filtering optics* – układ obrazujący 4F; *Virtual hologram plane* – obraz DMD; *Scanning optics* – układ skanujący; *Reflecting imaging optics* – system obrazujący; *Rotating tilted image of virtual hologram* – obserwowany obraz; *rotational axis* – oś obrotu; *Viewing Window* – okno obserwacji, *Eye of observer* – oko obserwatora.

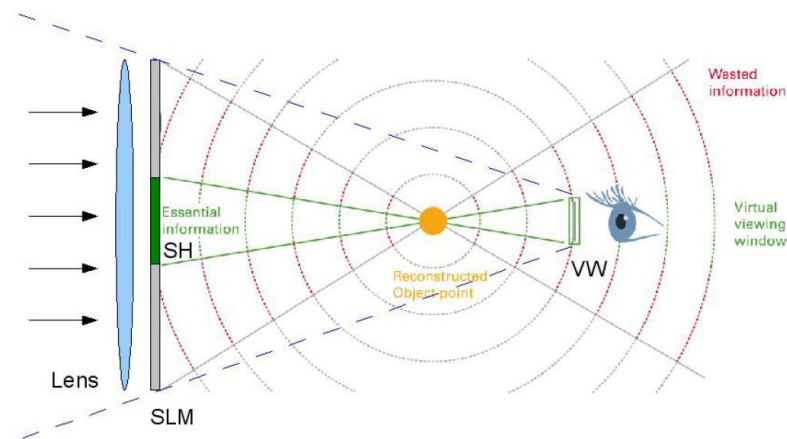
Kolejna metoda pozwalająca na zwiększenie SBP wyświetlacza bazuje na połączeniu multipleksingu przestrzennego i czasowego. W artykule [43] przedstawiona jest technika umożliwiająca zwiększenie kąta pola widzenia systemu przedstawionego w pracy [37]. Rozwiązanie polega na umieszczeniu dodatkowego modulatora SLM w płaszczyźnie obrazowej wyświetlacza, którego zadaniem jest zmiana kierunku propagacji wiązek obiektowych. Jest on zsynchronizowany z sześcioma panelami SLM umieszczonymi na bazie okręgu. Ilustracja układu zamieszczona jest na Rys. 2-10(a). W technice z każdego rzeczywistego modulatora tworzone są 4 wirtualne, co pokazane jest schematycznie na Rys. 2-10(b). Wykorzystywany jest w tym celu multipleksing czasowy. W rezultacie na wyjściu układu powstaje macierz 2×12 wirtualnych modulatorów. Metoda pozwala na usunięcie przerw pomiędzy elementami wynikających z konstrukcji matrycy SLM. Zapewnia ona dwukrotnie zwiększony kąt obserwacji zarówno w kierunku poziomym (z $17,5^\circ$ do 35°) jak i pionowym (z $1,6^\circ$ do $3,2^\circ$).



Rys. 2-10. (a) Schemat układu wyświetlacza holograficznego z sześcioma modulatorami umieszczonymi na bazie okręgu i jednym modulatorem zlokalizowanym w płaszczyźnie obrazu [43], (b) schemat tworzenia 4 wirtualnych modulatorów z jednego rzeczywistego z wykorzystaniem multipleksingu czasowego. Oznaczenia na rysunku: *Virtual SLMs* – wirtualne modulatory SLM; *SLM M* – modulator realizujący multipleksing czasowy; *reconstr. plane* – płaszczyzna rekonstrukcji, *SLM's active area* – powierzchnia modulatora SLM; $t + \Delta t$ – pojedynczy moment czasu.

Interesującą alternatywą dla wyżej wymienionych metod jest wyświetlenie hologramu w ograniczonym miejscu w przestrzeni oraz zastosowanie systemu śledzenia położenia źrenicy oka obserwatora [44 - 46]. Schemat obrazowania w przedstawionej technice zilustrowany jest

na Rys. 2-11. Polega ona na rekonstrukcji frontu falowego, wygenerowanego przez obiekt 3D, jedynie w niewielkim oknie obserwacji VW (ang. *Viewing Window*). Pozostała część informacji jest usuwana. Dzięki temu nie jest wymagane zwiększenie SBP wyświetlacza. Gdy użytkownik umieści oko wewnątrz VW obserwować może cały przedmiot. Okno obserwacji tworzone jest z zastosowaniem soczewki połowej. Rekonstruowany front falowy zakodowany jest w tzw. subhologramie SH, który generowany jest dla ograniczonego obszaru modulatora SLM. Jego wymiar i położenie zależą od geometrycznej projekcji VW, przez punkt obiektowy, do panelu SLM. Do komfortowej obserwacji obiektu 3D metoda musi być wsparta przez system śledzenia położenia oka. Dodatkowo wymagana jest generacja i wyświetlanie subhogramów w czasie rzeczywistym. W celu spełnienia powyższych zadań stosowany jest dodatkowy układ kamer, system przekierowujący wiązkę rekonstruującą oraz implementowane są specjalistyczne algorytmy przetwarzania obrazu.

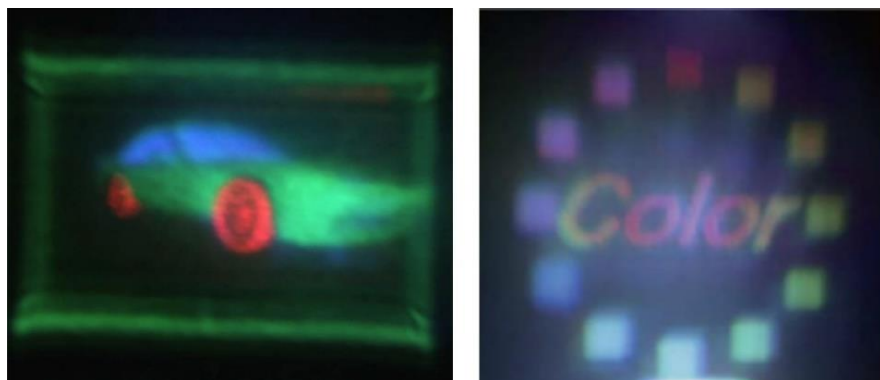


Rys. 2-11. Schemat obrazowania w układzie wyświetlacza z oknem obserwacji [44]. Oznaczenia na rysunku: *Essential information* – wymagana informacja; *Reconstructed object point* – zrekonstruowany punkt przedmiotowy; *Wasted information* – utracona informacja.

2.3. Rozwiązania wyświetlaczy holograficznych z oświetleniem niekoherentnym.

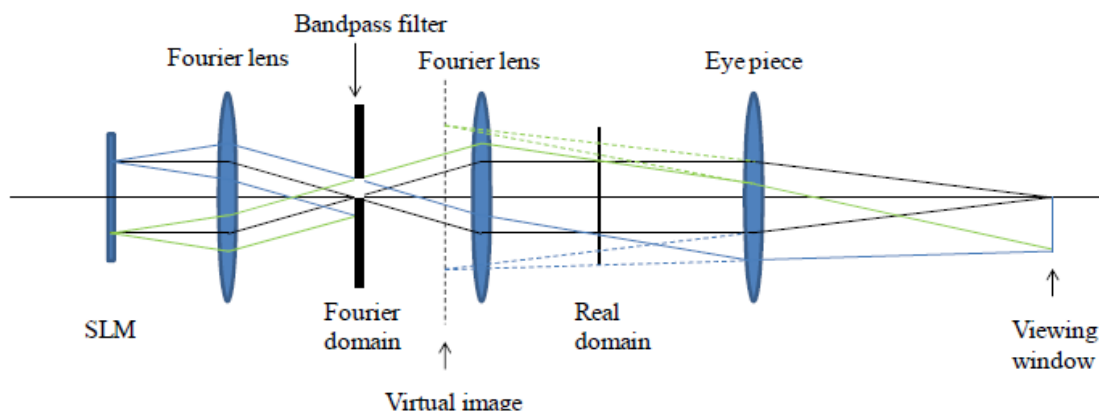
Większość wyświetlaczy holograficznych zbudowanych jest z wykorzystaniem lasera. Takie źródło światła pozwala na odtworzenie obiektu z najwyższą możliwą rozdzielczością oraz głębią. Z drugiej strony jakość zrekonstruowanego obrazu z wykorzystaniem koherentnego źródła światła obniżona jest przez wysokokoherentny szum plamkowy. Dodatkową wadą lasera jest niebezpieczeństwo uszkodzenia oka obserwatora. Naturalnym rozwiązaniem wymienionych problemów jest zastosowanie niekoherentnego oświetlenia.

W literaturze zademonstrowany jest szereg wyświetlaczy holograficznych z oświetleniem niekoherentnym [18 - 20, 22, 24, 27, 47]. Wszystkie wymienione rozwiązania, do odtworzenia obiektu 3D, wykorzystują modulację fazową. Z tego powodu możliwa jest w nich rekonstrukcja jedynie przedmiotów znajdujących się daleko od płaszczyzny hologramu. Gdy jest on umieszczony zbyt blisko modulatora nie wszystkie piksele urządzenia biorą udział w tworzeniu obrazu. Fakt ten jest niekorzystny w przypadku realizacji wyświetlacza holograficznego z oświetleniem typu LED. Jak pokazano w pracach analitycznych [48, 49] i eksperymentalnych [50], rozdzielczość oraz głębia rekonstrukcji jest w nim ograniczona przez stopień koherencji źródła światła. Przedstawione metody stosują rozwiązania pozwalające na zwiększenie koherencji przestrzennej źródła poprzez zastosowanie układu filtra przestrzennego lub mikroobiektywu. Mimo to jakość optycznych rekonstrukcji jest w nich niska (Rys. 2-12).

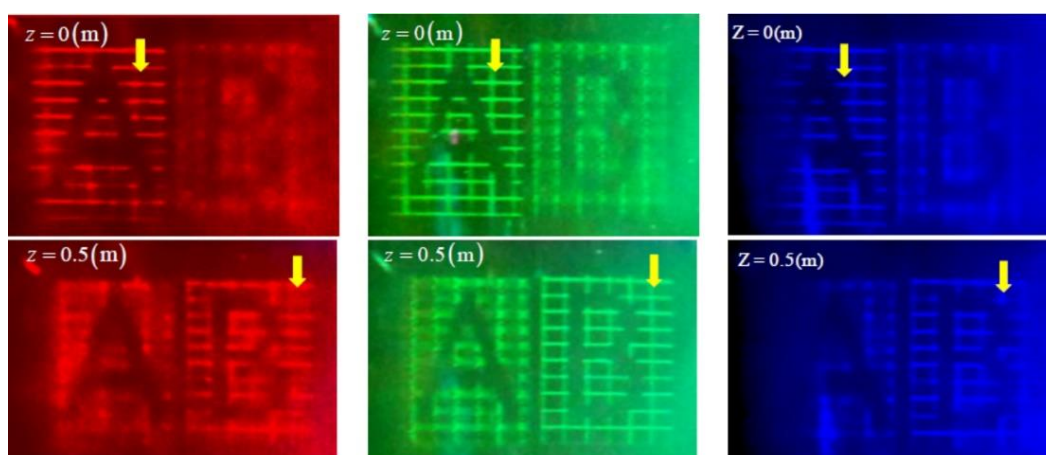


Rys. 2-12. Wyniki barwnych optycznych rekonstrukcji uzyskanych z wykorzystaniem niekoherentnego źródła światła w systemie pokazanym na (a) Rys. 2-1 [18] oraz (b) Rys. 2-2 [24].

Efektywne wykorzystanie przestrzeni koherencji źródła światła typu LED możliwe jest, gdy rekonstrukcja obiektu 3D uzyskiwana jest blisko płaszczyzny hologramu. W referencji [51] zaproponowane jest rozwiązanie pozwalające na uzyskanie przestrzeni rekonstrukcji wokół płaszczyzny modulatora. Schemat układu przedstawiony jest na Rys. 2-13. W zaprezentowanym systemie panel SLM wyświetla fazowy hologram. Zakodowana jest w nim zespolona amplituda obiektu, która odtwarzana jest z zastosowaniem układu obrazującego 4F złożonego z dwóch soczewek oraz filtra przestrzennego. Filtr umieszczony jest w płaszczyźnie Fouriera użytego modulatora. W ognisku drugiej soczewki powstaje rzeczywisty zespolony obraz przedmiotu, który obserwowany jest przez okular. Pomimo zoptymalizowanej konfiguracji wyświetlacza jakość otrzymywanych w nim optycznych rekonstrukcji, pokazana na Rys. 2-14, jest wciąż zbyt niska by uznać powstałe obrazy za atrakcyjne. Dodatkowo autorzy metody prezentują jedynie możliwość uzyskania monochromatycznych rekonstrukcji.



Rys. 2-13. Schemat wyświetlacza holograficznego z oświetleniem niekoherentnym, który umożliwia uzyskanie przestrzeni rekonstrukcji wokół płaszczyzny modulatora SLM [51]. Oznaczenia na rysunku: *Fourier lens* – soczewka układu obrazującego 4F; *Bandpass filter* – filtr przestrzenny; *Fourier domain* – płaszczyzna Fouriera modulatora SLM; *Real domain* – płaszczyzna rzeczywistego obrazu; *Eyepiece* – okular; *Viewing Window* – okno obserwacji.

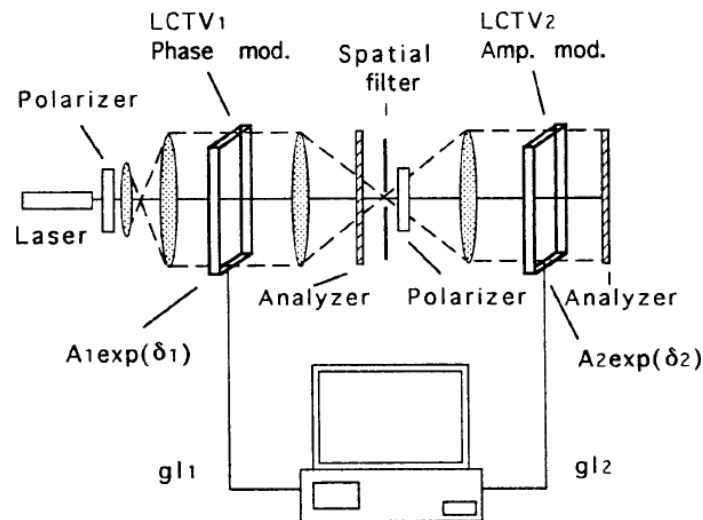


Rys. 2-14. Wyniki optycznych rekonstrukcji otrzymywanych w układzie wyświetlacza holograficznego pokazanego schematycznie na Rys. 2-13 [51].

2.4. Metody rekonstrukcji zespolonej amplitudy przedmiotu

W wyświetlaczu holograficznym zbudowanym z niekoherentnym źródłem światła rozdzielczość obrazowania spada wraz z odległością rekonstrukcji [48 - 50]. Dlatego wykorzystując oświetlenie typu LED pożądana jest konfiguracja systemu, w której zespolona amplituda przedmiotu odtworzona jest blisko płaszczyzny modulatora. Komercyjnie dostępne panele SLM pozwalają na modulację jedynie amplitudy lub fazy. Dlatego z wykorzystaniem pojedynczego urządzenia niemożliwa jest bezpośrednia rekonstrukcja informacji zespolonej. Najbardziej oczywistym rozwiązaniem tego problemu jest realizacja wyświetlacza

z zastosowaniem dwóch sprzężonych względem siebie modulatorów [52]. Schemat układu zilustrowany jest na Rys. 2-15. Rozwiązanie wykorzystuje dwa jednakowe panele SLM zbudowane z ciekłych kryształów. Tryb amplitudowy i fazowy uzyskiwany jest w nich z wykorzystaniem elementów polaryzacyjnych. W zaprezentowanym systemie pierwszy panel zapewnia fazową modulację w zakresie 2π . Natomiast drugi umożliwia uzyskanie wysokokontrastowej modulacji amplitudy. Modulatory sprzęgane są ze sobą za pomocą układu obrazującego 4F złożonego z dwóch soczewek. Metoda pozwala na precyzyjną rekonstrukcję amplitudy zespolonej obiektu. Wymagane jest w tym celu pozycjonowanie obu urządzeń piksel do piksela. Kalibracja wzajemnego położenia wykonywana jest z zastosowaniem mikroskopu. Błędy umieszczenia elementów względem siebie powodują powstawanie silnego efektu mory. Może być on zminimalizowany przez wstawienie filtra przestrzennego w płaszczyźnie Fouriera systemu 4F.



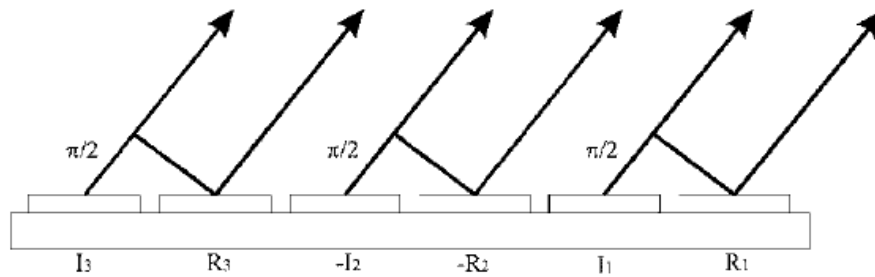
Rys. 2-15. Schemat układu wyświetlacza zapewniającego rekonstrukcję amplitudy zespolonej z wykorzystaniem dwóch sprzężonych ze sobą modulatorów światła [52]. Oznaczenia na rysunku:

Polarizer – polaryzator; *LCTV1* – modulator fazowy; *Analyzer* – analizator;

Spatial filter – filtr spektralny; *LCTV2* – modulator amplitudowy.

Kolejną techniką umożliwiającą uzyskanie rekonstrukcji amplitudy zespolonej przedmiotu jest połączenie dwóch sąsiednich pikseli modulatora w jeden „superpiksel” o wymiarach 2×1 . W ten sposób zapewnione są stopnie swobody wymagane do niezależnej modulacji amplitudy i fazy [53, 54]. W metodzie zademonstrowanej w referencji [53] jeden piksel fazowego modulatora SLM adresowany jest przez część rzeczywistą wiązki przedmiotowej, natomiast drugi przez jej część urojoną. Żeby wygenerować stałe opóźnienie fazowe, znaki sąsiednich pikseli powinny być przeciwne. Odtworzenie amplitudy zespolonej przedmiotu

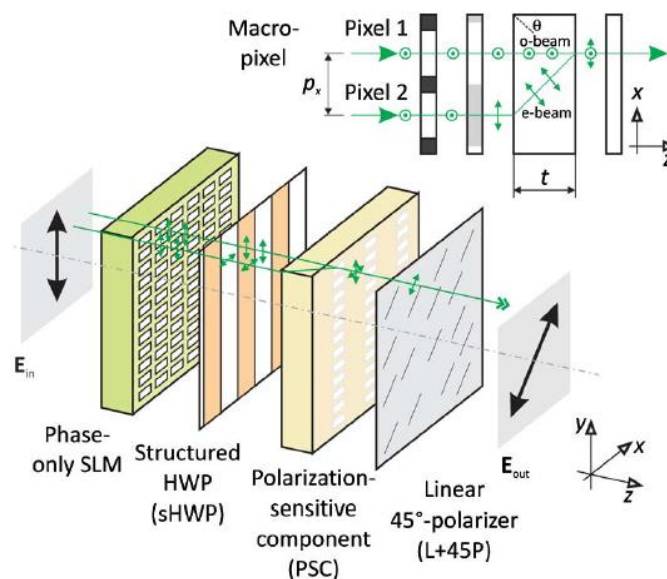
możliwe jest dla kąta, dla którego powstaje opóźnienie fazy równe $\pi/2$ między sąsiednimi pikselami, co pokazane zostało schematycznie na Rys. 2-16.



Rys. 2-16. Schemat metody powstawania modulacji zespolonej z wykorzystaniem dwóch pikseli [53].

Oznaczenia na rysunku: I – część urojona amplitudy zespolonej obiektu; R – część rzeczywista;

Artykuł [54] przedstawia alternatywne rozwiązanie wykorzystujące koncept „superpiksela”. Schemat działania metody oraz budowy układu zespolonego wyświetlacza holograficznego zilustrowane są na Rys. 2-17. W zademonstrowanej technice na fazowy

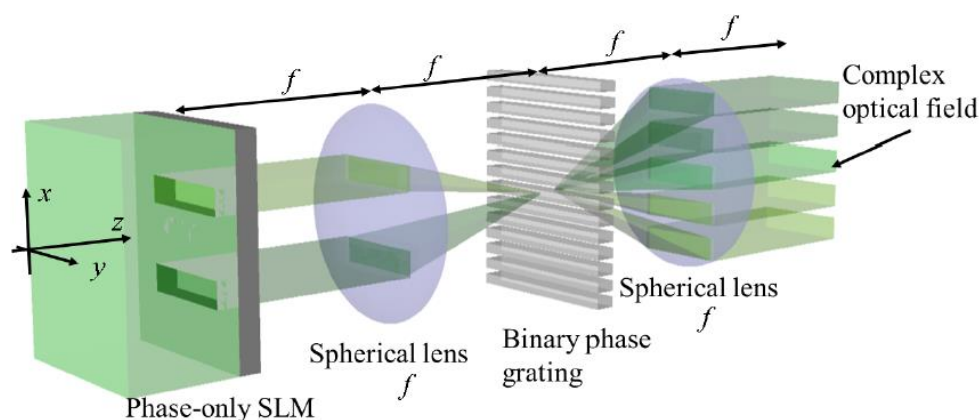


Rys. 2-17. Schemat działania metody rekonstrukcji zespolonego frontu falowego z wykorzystaniem techniki „superpiksela” (górna część rysunku) oraz ilustracja budowy zespolonego wyświetlacza holograficznego z fazowym modulatorem SLM oraz elementami polaryzacyjnymi (dolna część rysunku) [54]. Oznaczenia na rysunku: *Macropixel* – „superpiksel”; E_{in} – pole wejściowe; *Phase-only SLM* – fazowy modulator SLM; *Structured HWP (sHWP)* – zaprojektowana płytką półfalowa; *Polarization-sensitive component (PSC)* – element polaryzacyjny łączący dwie wiązki utworzone przez sąsiednie piksele; *Linear 45°-polarizer (L+45P)* - polaryzator; E_{out} – pole wyjściowe.

modulator SLM pada liniowo spolaryzowana wiązka o płaskim czole falowym. Za panelem umieszczona jest specjalnie zaprojektowana płytką półfalowa sHWP, w której co druga

kolumna pikseli ma obrócony o 90° wektor pola elektrycznego. W rezultacie dwa piksele składające się na jeden „superpiksel” mają ortogonalne stany polaryzacji. Następnie wiązki utworzone przez sąsiednie piksele łączone są ze sobą z zastosowaniem elementu PSC w postaci płytki dwójłomnej lub polaryzacyjnej siatki dyfrakcyjnej. Na wyjściu układu umieszczony jest polaryzator o osi polaryzacji ustawionej pod kątem 45° . Za nim uzyskiwana jest interferencja między dwoma ortogonalnie spolaryzowanymi wiązkami, co umożliwia odtworzenie zespolonego sygnału.

W innym rozwiązaniu, pokazanym schematycznie na Rys. 2-18, fazowy modulator SLM adresowany jest przez dwa odseparowane od siebie hologramy, które umieszczone są symetrycznie względem osi poziomej urządzenia [55]. W celu prawidłowego oddzielenia od siebie obu obszarów, przed powierzchnią modulatora umieszczona jest podwójna szczelina. Następnie hologram obrazowany jest przez układ obrazujący 4F, złożony z dwóch soczewek sferycznych. W płaszczyźnie Fouriera systemu znajduje się specjalnie zaprojektowana, binarna, fazowa siatka dyfrakcyjna. Pozwala ona na uzyskanie koherentnej superpozycji dolnego i górnego hologramu w centralnej części płaszczyzny wyjściowej wyświetlacza. W obszarze tym rekonstruowane jest zespolone pole optyczne.



Rys. 2-18. Schemat układu zespolonego wyświetlacza holograficznego z pojedynczym, fazowym modulatorem światła oraz siatką dyfrakcyjną [55]. Oznaczenia na rysunku:

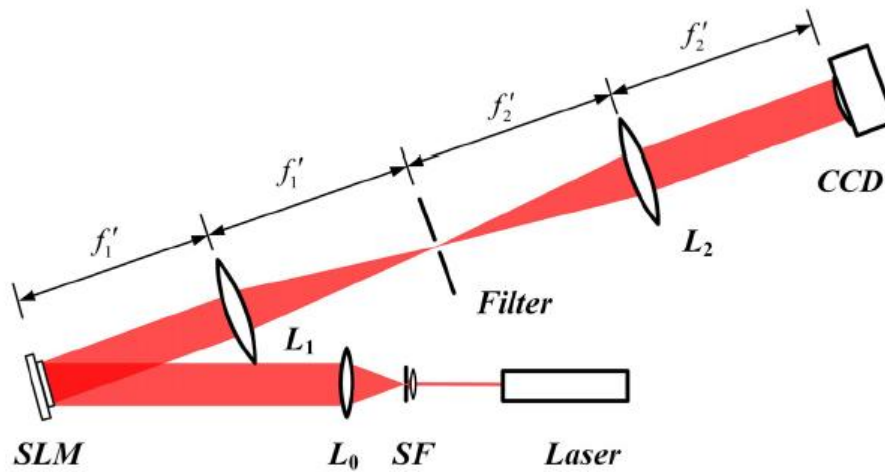
Phase-only SLM – fazowy modulator SLM; *Spherical lens f* – soczewka sferyczna;

Binary phase grating – binarna, fazowa siatka dyfrakcyjna; *Complex optical*

field – zespolone pole optyczne.

Kolejna metoda umożliwiająca rekonstrukcję amplitudy zespolonej obiektu zaproponowana została w pracy [56]. W technice tej informacja zespolona kodowana jest w fazowym hologramie. Ma on postać kosinusoidalnej siatki. W układzie rekonstrukcji,

pokazanym schematycznie na Rys. 2-19, realizowane jest eksperymentalne dekodowanie informacji zespolonej. W tym celu stosowany jest układ 4F (zbudowany z soczewek L_1 i L_2 o jednakowych wartościach ogniskowych) oraz filtr przestrzenny. Przepuszcza on jedynie +1 rząd dyfrakcyjny modulatora. Dzięki temu możliwa jest rekonstrukcja wysokiej jakości zespolonego obiektu 3D.



Rys. 2-19. Schemat układu wyświetlacza holograficznego umożliwiającą dekodowanie amplitudy zespolonej z wykorzystaniem fazowego modulatora SLM i filtra przestrzennego w jego płaszczyźnie Fouriera [56].

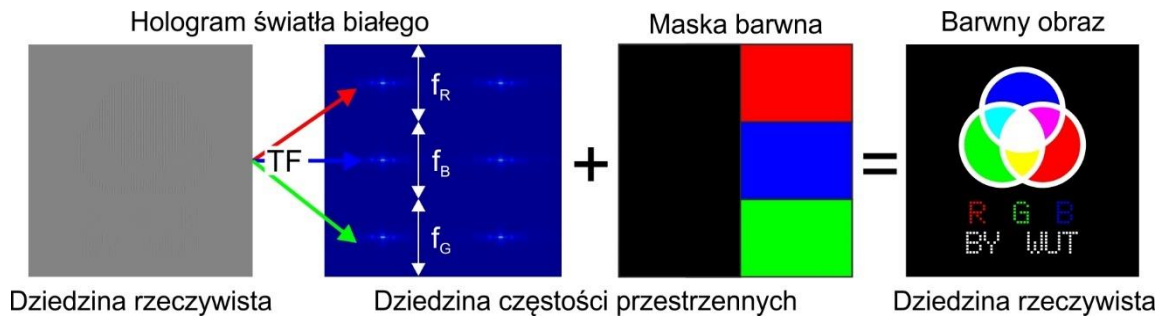
3. Barwny wyświetlacz holograficzny z pojedynczym, fazowym modulatorem SLM oraz źródłem światła białego

Rozdział ten zawiera opis barwnego wyświetlacza holograficznego z fazowym modulatorem SLM oraz źródłem światła białego. Umożliwia on uzyskanie wysokiej jakości barwnej rekonstrukcji obiektu 2D i 3D z pojedynczego hologramu. Barwa przedmiotu odtworzona jest z użyciem nowej, opracowanej metody nazwanej multipleksingiem częstotliwościowym, która została opublikowana w artykule [57]. Stanowi ona dopełnienie rozwiązań rekonstrukcji barwy opisanych w rozdziale 2.1. Technika realizowana jest w dwóch etapach. Pierwszy polega na numerycznym kodowaniu trzech barwnych hologramów RGB w zespolonym hologramie światła białego. W drugim realizowane jest eksperymentalne dekodowanie barwy z zastosowaniem białej diody LED oraz specjalnie zaprojektowanej maski barwnej umieszczonej w płaszczyźnie Fouriera modulatora SLM. Jest ona zbudowana z filtrów RGB, których położenie odpowiada częstotliwościom przestrzennym hologramów składowych. W przedstawionym systemie wyświetlacza objętość obiektu 3D zlokalizowana jest wokół płaszczyzny modulatora SLM. Taka konfiguracja pozwala na efektywne wykorzystanie głębi rekonstrukcji systemu, która ograniczona jest przez stopień koherencji źródła światła.

3.1 Koncepcja rekonstrukcji zespolonego, barwnego obiektu

Zaproponowany w pracy system barwnego wyświetlacza holograficznego umożliwia uzyskanie wysokiej jakości barwnych rekonstrukcji obiektów 3D, z zastosowaniem opracowanej metody multipleksingu częstotliwościowego [57]. Układ zbudowany jest z wykorzystaniem pojedynczego, fazowego modulatora SLM, diody światła białego oraz specjalnie zaprojektowanej maski, która składa się z trzech filtrów barwnych RGB i filtra absorpcyjnego. Koncepcja realizacji systemu zaprezentowana jest schematycznie na Rys. 3-1. W opracowanej metodzie modulator SLM wyświetla zespolony hologram światła białego, w którym zakodowane są trzy składowe hologramy. Każdy z nich wygenerowany jest dla innej barwy RGB rozpatrywanego obiektu. Hologramy składowe zajmują wspólną przestrzeń w dziedzinie rzeczywistej sygnału. Natomiast każdy z nich wygenerowany jest dla różnych zakresów częstotliwości przestrzennych f . Dekodowanie zespolonego, barwnego przedmiotu odbywa się z wykorzystaniem maski umieszczonej w płaszczyźnie Fouriera modulatora SLM. Przestrzenne położenie poszczególnych filtrów RGB, z których jest ona zbudowana, odpowiada zakresom częstotliwości wygenerowanych hologramów składowych. Natomiast filtr absorpcyjny przepuszcza jedynie +1 rząd dyfrakcyjny urządzenia SLM. Gdy

modulator oświetlony jest przez białą diodę LED powstają trzy monochromatyczne obrazy, które rekombinują ze sobą w płaszczyźnie rekonstrukcji wyświetlacza tworząc barwną, zespoloną rekonstrukcję przedmiotu 3D.

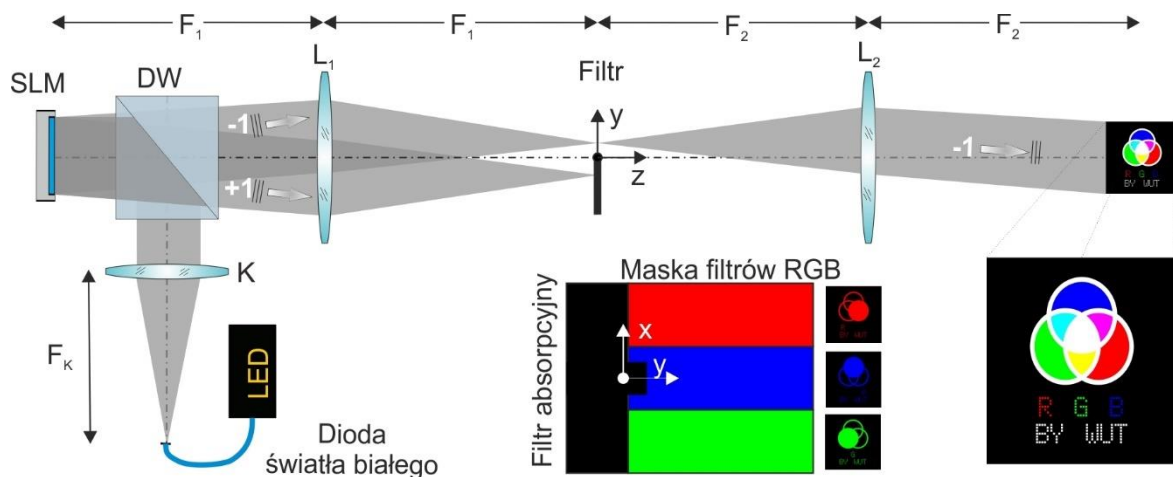


Rys. 3-1. Koncepcja systemu barwnego wyświetlacza holograficznego z wykorzystaniem metody multipleksingu częstościowego.

3.2. Budowa systemu wyświetlacza

Układ barwnego wyświetlacza holograficznego z pojedynczym źródłem światła białego przedstawiony jest na Rys. 3-2. Zbudowany jest on z wykorzystaniem pojedynczego fazowego modulatora SLM (Holoeye 1080P, wymiar piksela $\Delta = 8 \mu\text{m}$, rozdzielczość 1080×1920), diody światła białego (DoricLenses W55, średnica rdzenia światłowodu $960 \mu\text{m}$) oraz specjalnie zaprojektowanej maski barwnej. W zaprezentowanym układzie odbiciowy, fazowy modulator oświetlony jest przez wiązkę o płaskim czole falowym padającą prostopadle do jego powierzchni. Jest ona tworzona przez układ kolimujący składający się z achromatycznej soczewki K o ogniskowej $F_K = 400 \text{ mm}$ oraz diody LED. Dioda światła białego wykorzystywana w wyświetlaczu posiada wyprowadzenie światłowodowe, którego końcówka znajduje się w płaszczyźnie ogniskowej soczewki K. Normalny kierunek oświetlenia modulatora uzyskiwany jest za pomocą dzielnika wiązki DW w postaci kostki światłodzielnącej. Za modulatorem znajduje się układ obrazujący 4F składający się z dwóch soczewek L_1 ($F_1 = 200 \text{ mm}$) i L_2 ($F_2 = 200 \text{ mm}$). Tworzą one odwrócony, rzeczywisty obraz o jednostkowym powiększeniu ($m = -1$). W płaszczyźnie Fouriera modulatora umieszczona jest specjalnie zaprojektowana maska, która składa się z pionowego filtra absorpcyjnego oraz trzech filtrów barwnych RGB umieszczonych jeden nad drugim. Jej budowa jest szczegółowo opisana w rozdziale 3.3. Filtr absorpcyjny przepuszcza jedynie dodatnie rzędy dyfrakcyjne modulatora SLM. Rząd zerowy oraz rzędy ujemne są przez niego usuwane. Zastosowanie filtra umożliwia rekonstrukcję zespolonego frontu falowego zakodowanego w fazowym hologramie. Implementacja metody opisana jest w rozdziale 3.4. Wykorzystanie trzech filtrów RGB

umożliwia rekonstrukcję barwnego obiektu 3D z hologramu światła białego, którego generacja opisana jest w rozdziale 3.5. Wymiary obrazu ograniczone są przez wymiary użytego urządzenia SLM i wynoszą 15,4 mm szerokości i 8,6 mm wysokości. Objętość rekonstrukcji zlokalizowana jest wokół płaszczyzny optycznej kopii modulatora. Natomiast głębina przedmiotu zależy od koherencji czasowej i przestrzennej źródła światła. Dla białej diody LED o wymiarze 960 μm i powiększenia 1:1 wynosi ona około 100 mm.

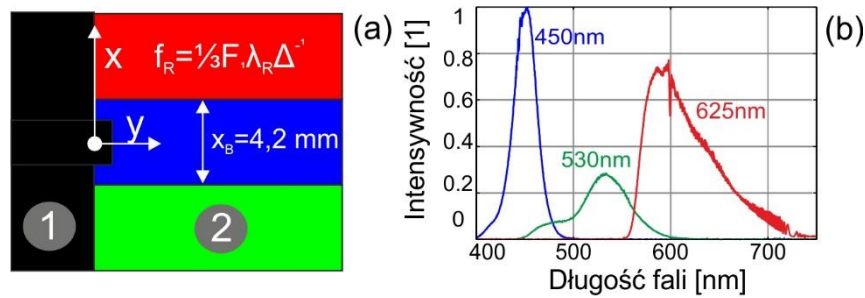


Rys. 3-2. System barwnego wyświetlacza holograficznego bazującego na metodzie multipleksingu częstotliwościowego z pojedynczym, fazowym modulatorem SLM oraz niekoherentnym źródłem światła białego.

3.3. Budowa maski barwnej

Do prawidłowego działania metody multipleksingu częstotliwościowego konieczne jest zastosowanie specjalnie zaprojektowanego filtra barwnego, którego budowa zilustrowana jest na Rys. 3-3(a). Składa się on z czernionej płytki szklanej oznaczonej numerem 1 oraz trzech filtrów barwnych oznaczonych numerem 2. Pierwszy element pełni rolę absorpcyjnego filtra umożliwiającego rekonstrukcję zespolonego frontu falowego z fazowego hologramu (rozdział 3.4). Drugi umożliwia dekodowanie barwy z hologramu światła białego wyświetlanego na SLM (rozdział 3.5). Jest on zbudowany z filtrów spektralnych firmy Shott z oznaczeniami OG570, VG9, BG25 o centralnej długości fali kolejno 625 nm, 530 nm i 450 nm. Właściwości spektralne maski oświetlonej diodą światła białego zamieszczone są na Rys. 3-3(b). Zostały one zmierzone z wykorzystaniem spektrometru firmy Thorlabs [58]. Uzyskane wartości intensywności zostały znormalizowane. Na kształt krzywych wpływa charakterystyka źródła światła białego oraz właściwości transmisyjne użytych filtrów.

Wymiar filtrów RGB w kierunku pionowym dobrany jest w taki sposób, żeby uzyskać równą rozdzielczość składowych hologramów RGB. Zależy on od wymiaru modulatora, długości fali oraz ogniskowej soczewki L_1 . Odpowiednia separacja pomiędzy składowymi komponentami możliwa jest do osiągnięcia tylko w przypadku, gdy niebieski filtr znajduje się w środku zaprojektowanej maski. Dla innej konfiguracji pełne wykorzystanie przestrzeni częstotliwości modulatora jest niemożliwe. W zastosowanym rozwiązaniu komponent czerwony odpowiada dodatniemu, a zielony ujemnemu zakresowi częstotliwości modulatora.



Rys. 3-3. a) Budowa maski barwnej oraz

b) jej właściwości spektralne przy oświetleniu białą diodą LED.

3.4. Kodowanie i dekodowanie zespolonego frontu falowego

W swojej pracy wybrałem metodę kodowania zespolonego w fazie realizowanego w dwóch etapach [56]. W pierwszym etapie wykonywane jest numeryczne kodowanie hologramu zespolonego, natomiast w drugim jego eksperymentalne dekodowanie. Schemat techniki przedstawiony jest na Rys. 3-4. W pierwszym kroku zaimplementowanego rozwiązania częstotliwość hologramu f_y jest ograniczana w kierunku poziomym:

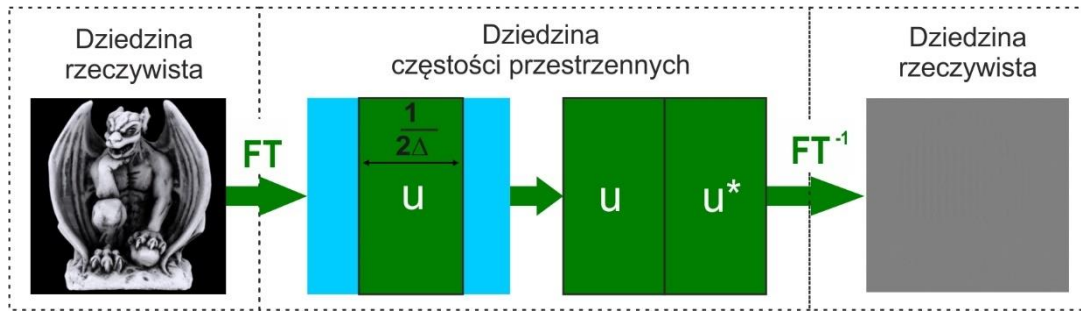
$$-\frac{1}{4\Delta} < f_y < \frac{1}{4\Delta}, \quad (3-1)$$

gdzie Δ oznacza wymiar piksela modulatora SLM. Dostęp do częstotliwości przedmiotu uzyskiwany jest przez wykonanie transformaty Fouriera, która pozwala na przejście z dziedziny rzeczywistej przedmiotu do dziedziny częstości przestrzennych. W rezultacie powstaje sygnał $u_{BL}(y)$ o ograniczonym paśmie częstotliwościowym. Następnie tworzony jest z niego sygnał rzeczywisty $u_{re}(y)$ opisany wzorem:

$$u_{re}(y) = 0.5[u_{BL} \exp(i2\pi y f_y) + u_{BL}^* \exp(-i2\pi y f_y)], \quad (3-2)$$

gdzie u_{BL}^* oznacza sygnał sprzężony. Ponieważ w pracy wykorzystywana jest modulacja fazowa sygnał $u_{re}(y)$ kodowany jest w fazowym hologramie:

$$u(y) = \exp\{iu_{re}(y)\}. \quad (3-3)$$



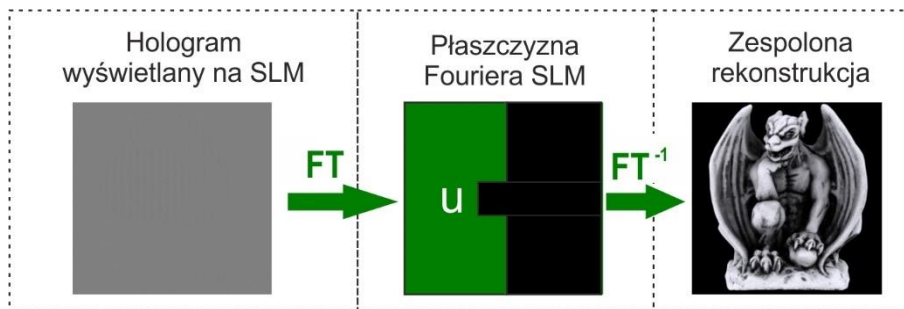
Rys. 3-4. Schemat numerycznego kodowania informacji zespolonej w fazowym hologramie.

W drugim etapie realizowane jest eksperymentalne dekodowanie informacji zespolonej. Proces ten został schematycznie zilustrowany na Rys. 3-5. Podczas rekonstrukcji optycznej z wykorzystaniem fazowego modulatora SLM w płaszczyźnie rekonstrukcji powstaje zestaw rzędów dyfrakcyjnych opisanych równaniem:

$$u_{re}(y) = 0.5 \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_q\{M|u_{BL}(y)|\} \exp(i2\pi qy f_y + qArg\{u_{BL}(y)\}), \quad (3-4)$$

gdzie q oznacza rząd dyfrakcyjny, J funkcję Bessela, a M współczynnik mocy. W zrealizowanym systemie rzędy dyfrakcyjne $q \leq 0$ są usuwane za pomocą filtra absorpcyjnego umieszczonego w płaszczyźnie Fouriera modulatora. Natomiast rzędy dyfrakcyjne $q > 1$ mają niewielką wydajność dyfrakcyjną i mogą być pominięte. Z tego powodu rekonstruowany jest tylko pierwszy rząd dyfrakcyjny:

$$u_r(y) = 0.5J_1\{M|u_{BL}(y)|\} \exp(2\pi i y f_y + iArg\{u_{BL}(y)\}). \quad (3-5)$$



Rys. 3-5. Schemat optycznego dekodowania informacji zespolonej z fazowego hologramu.

Na wyjściu układu uzyskiwana jest amplituda zespolona obiektu 3D o rozdzielczości zmniejszonej o połowę w kierunku poziomym.

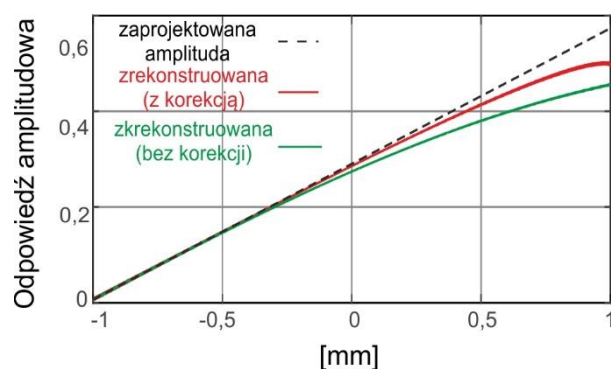
Zgodnie z równaniem (3-5) amplituda zrekonstruowanej fali, z wykorzystaniem przedstawionej metody kodowania zespolonego, charakteryzowana jest przez funkcję Bessela pierwszego rodzaju. Funkcja ta ma liniowy przebieg dla małych wartości M . Dla dużych wartości staje się on nieliniowy. W zaproponowanej metodzie możliwe jest ograniczenie współczynnika M tak, żeby rozpatrywana była tylko liniowa część funkcji Bessela. Skutkuje to jednak niską wydajnością dyfrakcyjną zrekonstruowanych obrazów. Aby uzyskać wysoką wydajność należy wykorzystać nieliniową część funkcji J_1 . Powoduje to jednak nieliniowo zniekształconą amplitudą zrekonstruowanego obrazu. Efekt ten może być zminimalizowany, gdy SLM adresowany jest przez funkcję korekcji $CF(M|u_{BLc}(y)|)$, która generuje sygnał $u_{BL}(y)$ o skorygowanej amplitudzie:

$$u_r(y) = 0.5J_1\{CF(M|u_{BLc}(y)|)\} \times \exp\{i2\pi y f_y + iArg(u_{BL}(y))\}, \quad (3-6)$$

gdzie indeks c oznacza rozkład korygujący amplitudę. Rozkład amplitudy funkcji korekcji CF określa zależność:

$$J_1(CF(M|u_{BLc}(y)|)) = M|u_{BL}(y)|. \quad (3-7)$$

CF pozwala na usunięcie nieliniowego błędu modulacji amplitudowej zrekonstruowanego obrazu i jest obliczana z wykorzystaniem metody interpolacji.



Rys. 3-6. Ilustracja wydajności i dokładności zaproponowanej metody korekcji rozkładu amplitudy przedmiotu.

Wydajność i dokładność przedstawionej metody przeanalizowana jest przez wykonanie numerycznej rekonstrukcji przedmiotu o liniowo rosnącym rozkładzie amplitudy w zakresie od 0 do 0,58. Wartość 0,58 odpowiada maksymalnej wydajności dyfrakcyjnej, która osiągnięta jest dla modulacji fazowej. Wyniki symulacji przedstawione są na Rys. 3-6. Amplituda przedmiotu oznaczona jest czarną przerywaną linią. Czerwona linia reprezentuje zrekonstruowaną amplitudę z zastosowaniem funkcji korekcji CF , natomiast linia zielona bez. Otrzymane

rezultaty udowadniają, że zaproponowana metoda pozwala na zmniejszenie błędów nieliniowości odpowiedzi amplitudowej rekonstrukcji holograficznej.

3.5. Metoda generacji zespolonego hologramu światła białego

Przedstawiona w tym rozdziale metoda generacji hologramu światła białego jest rozwinięciem techniki opisanej w rozdziale 3.4. Pozwala ona na zakodowanie barwy obiektu w pojedynczym, zespolonym hologramie. Schemat algorytmu przedstawiony jest na Rys. 3-7. Górny przerywany prostokąt „Dziedzina rzeczywista” przedstawia wejściowe obrazy RGB. Środkowy „Dziedzina częstotliwości przestrzennych” pokazuje proces powstawania trzech barwnych hologramów rzeczywistych. Dolny „Dziedzina rzeczywista” ilustruje przetwarzanie końcowe. W pierwszym kroku algorytmu tworzone są trzy składowe hologramy dla kanałów RGB rozpatrywanego obiektu. Następnie każdy z nich ograniczany jest w dziedzinie częstości przestrzennej. Częstotliwość w kierunku poziomym f_y spełnia zależność opisaną równaniem (3-1). Jest to element metody kodowania zespolonego, umożliwiającej rekonstrukcję zespolonego frontu falowego, która opisana jest w rozdziale 3.4. Częstotliwość w kierunku pionowym f_x ograniczona jest zgodnie z równaniem:

$$-\frac{1}{6\Delta} < f_x < \frac{1}{6\Delta} . \quad (3-8)$$

W rezultacie powstają trzy równo ograniczone częstotliwościowo sygnały $u_{BL,p}(y)$, gdzie $p = R,G,B$ oznacza składowe barwy. Hologramy RGB zajmują tę samą przestrzeń w dziedzinie rzeczywistej sygnału, ale różną przestrzeń w dziedzinie częstości przestrzennych. Odpowiada ona położeniu filtrów RGB w płaszczyźnie Fouriera modulatora SLM:

$$f_{xSLM} = \begin{cases} -\frac{1}{2\Delta} < f_G < -\frac{1}{6\Delta} \\ -\frac{1}{6\Delta} < f_B < \frac{1}{6\Delta} \\ \frac{1}{6\Delta} < f_R < \frac{1}{2\Delta} \end{cases} . \quad (3-9)$$

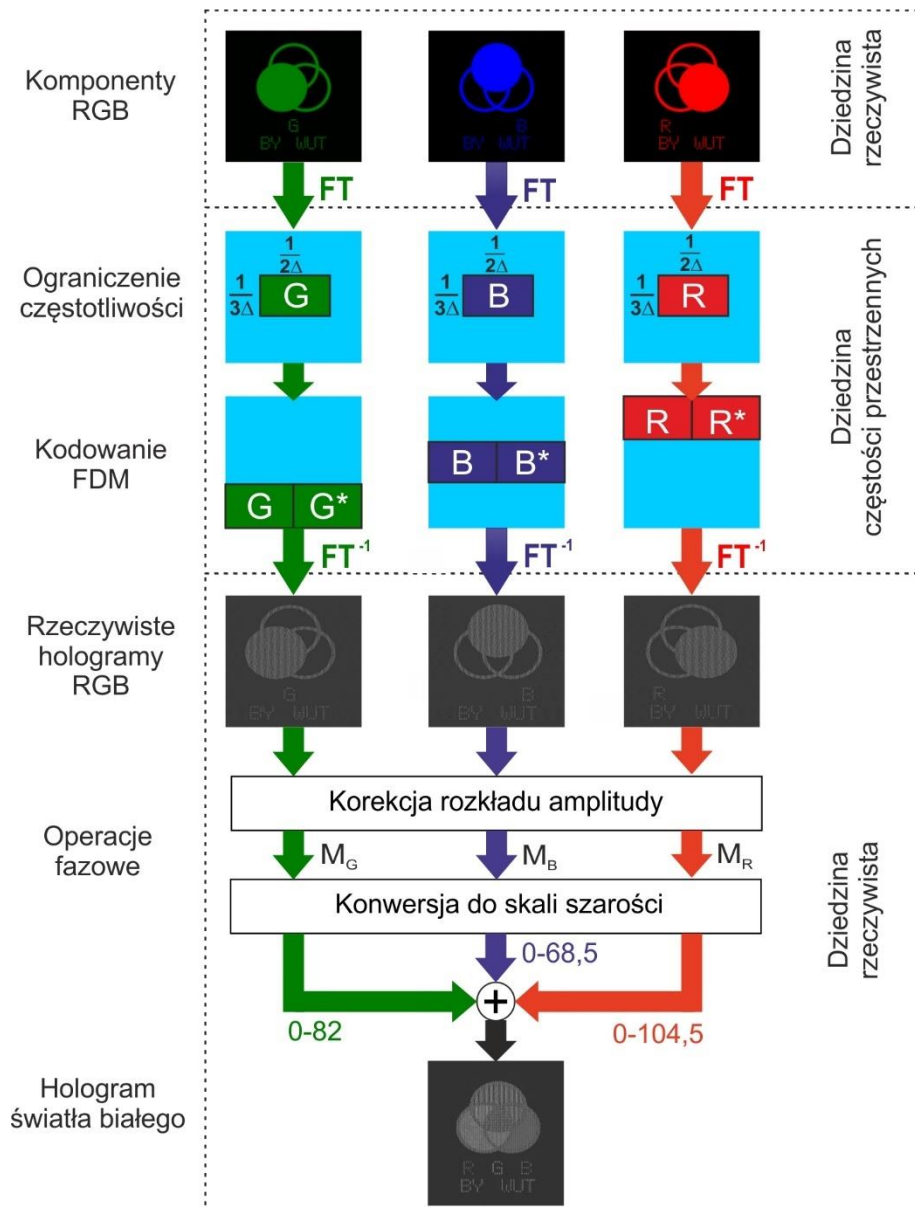
Następnie wszystkie składowe komponenty kodowane są w pojedynczym sygnale rzeczywistym:

$$u_{re}(y) = 0.5 \sum_{p=R,G,B} M_p [u_{BL,p} \exp(i2\pi y f_{m,p}) + \bar{u}_{BL,p} \exp(-i2\pi y f_{m,p})], \quad (3-10)$$

gdzie $f_{m,p}$ oznacza położenie zakresu częstotliwości komponentów RGB, a M_p jest współczynnikiem korekcyjnym mocy kanałów umożliwiającym dopasowanie intensywności każdego z nich w płaszczyźnie rekonstrukcji. Rys. 3-3(b) pokazuje właściwości spektralne użytych filtrów barwnych, oświetlonych diodą światła białego. Intensywność każdego

komponentu jest inna. Dlatego, do uzyskania prawidłowego balansu bieli w zrekonstruowanym obrazie, potrzebny jest dobór odpowiednich wartości M_p . Efekt ten jest omówiony w rozdziale 3.8. W ostatnim etapie sygnał $u_{re}(y)$ kodowany jest zgodnie z równaniem (3-10) w fazowym hologramie, który nazywany jest zespolonym hologramem światła białego. Jak wyjaśniono w poprzednim rozdziale w systemie wyświetlacza rekonstruowany jest tylko pierwszy rząd dyfrakcyjny. Dla zaproponowanej metody multipleksingu częstotliwościowego obraz holograficzny opisany jest równaniem:

$$u_r(y) = 0.5 \sum_{p=R,G,B} J_1\{M_p |u_{BL,p}(y)|\} \times \exp\{i2\pi y f_{m,p} + iArg(u_{BL,p}(y))\}. \quad (3-11)$$

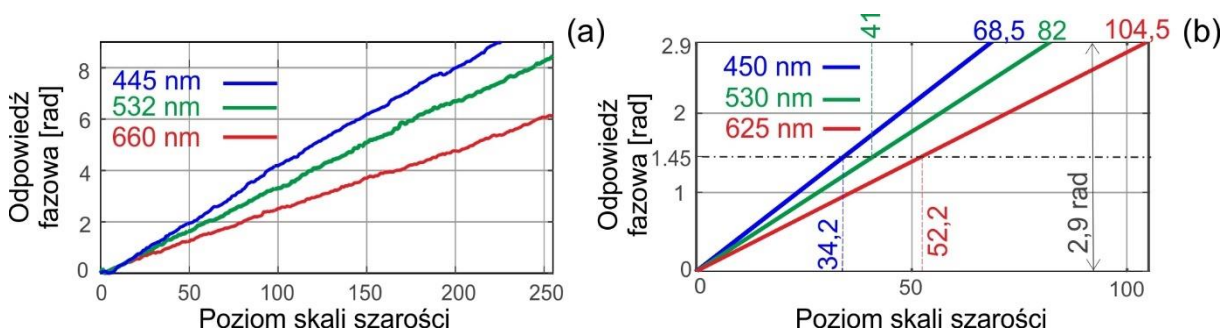


Rys. 3-7. Schemat algorytmu generacji hologramu światła białego.

Otrzymana rekonstrukcja ma rozkład z nieliniowo zniekształconą amplitudą, która charakteryzowana jest przez funkcję Bessela pierwszego rodzaju. Efekt ten minimalizowany jest przez zastosowanie tablicy korekcyjnej uwzględniającej nieliniowość zrekonstruowanej amplitudy. Szczegółowy opis metody znajduje się w Rozdziale 3.4.

Modulator SLM, zbudowany z ciekłych kryształów, jest elementem dyspersyjnym. Jego odpowiedź fazowa zależy od długości fali użytego źródła światła. Najwyższą głębokość modulacji uzyskuje się dla barwy niebieskiej, a najniższą dla czerwonej. W celu zrekonstruowania zespolonego frontu falowego bez błędów odtworzenia fazy oraz zapewnienia prawidłowej rekonstrukcji barwy, różnica odpowiedzi fazowych musi być uwzględniona podczas generacji hologramu.

Odpowiedzi fazowe modulatora dla trzech długości fal RGB wyznaczone są podczas procedury kalibracji z wykorzystaniem interferometru z dwoma szczelinami oraz oświetleniem laserowym [59]. W pierwszym kroku SLM kalibrowany jest dla zielonej długości fali $\lambda_G = 532$ nm. Następnie mierzona jest odpowiedź fazowa dla niebieskiego ($\lambda_B = 445$ nm) i czerwonego ($\lambda_R = 660$ nm) lasera. Wyniki pomiarów przedstawione zostały na Rys. 3-8(a). Otrzymane krzywe mają charakter liniowy, a ich kąt nachylenia zależy od długości fali.



Rys. 3-8. (a) Zmierzone odpowiedzi fazowe modulatora SLM dla trzech długości fali: 445 nm, 532 nm i 660 nm. (b) Krzywe odpowiedzi fazowych wykorzystane do generacji hologramów barwnych komponentów RGB.

Długości fali użyte podczas procesu kalibracji różnią się od centralnych długości fal diod LED użytych w układzie wyświetlacza. Dlatego, stosując metody interpolacji, krzywe kalibracyjne są przeliczane w taki sposób, żeby znaleźć odpowiedzi fazowe dla centralnych długości fal diod RGB. W przedstawionym systemie modulator SLM zapewnia rekonstrukcję obiektów o maksymalnej wartości amplitudy równej 0,55. Realizowane jest to przez modulację fazy modulatora w zakresie $\pm 1,45$ rad. Z tego powodu każdy składowy hologram RGB generowany jest dla modulacji w zakresie od 0 do 2,9 rad z wykorzystaniem krzywych zaprezentowanych na Rys. 3-8(b). Z wykresu widać, że maksymalna wartość modulacji oraz

jej połowa uzyskiwane są dla innego poziomu skali szarości hologramów RGB. Najwyższa dyspersja światła występuje dla barwy czerwonej. Dlatego głębokość bitowa dla barwy zielonej i niebieskiej jest ograniczana podczas generacji hologramów. Linie reprezentujące odpowiedzi fazowe zostały zaprojektowane w taki sposób, żeby suma poziomów skali szarości wszystkich komponentów barwnych równa była wartości 255. Wymaga to ograniczenia skali składowych RGB do wartości kolejno 68,5, 82 i 104,5.

3.6. Metoda kalibracji położenia maski barwnej

W przedstawionym systemie wyświetlacza holograficznego istotne jest precyzyjne pozycjonowanie maski barwnej tak, żeby nie dochodziło do „wyciekania” częstotliwości zajmowanych przez jeden składowy hologram RGB do komponentu o innej barwie. Dlatego w przedstawionym systemie wyświetlacza konieczna jest kalibracja położenia filtrów w płaszczyźnie Fouriera modulatora. W zaproponowanym rozwiązaniu filtr niebieski znajduje się w środku maski, a filtry czerwony i zielony pełnią funkcję filtra górnoprzepustowego i dolnoprzepustowego (równanie (3-9)). W procesie kalibracji znajdowane są częstotliwości odcięcia f_x dla kanałów RGB w kierunku pionowym, które uwzględniane są podczas generacji hologramu światła białego.

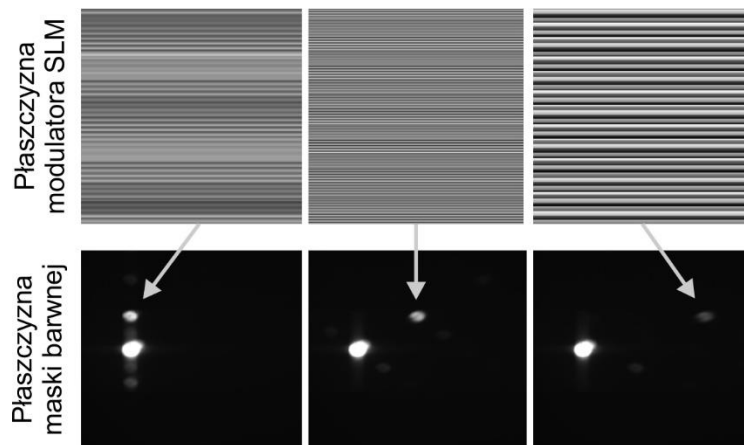
Przeprowadzenie kalibracji położenia maski barwnej wymaga modyfikacji układu wyświetlacza zaprezentowanego na Rys. 3-2. Po pierwsze źródło światła białego zastępowane jest monochromatycznym. Realizowane jest to poprzez wstawienie niebieskiego filtra spektralnego za kolimatorem K. W rezultacie tylko jeden barwny komponent tworzy obraz. Po drugie płaszczyzna maski jest optycznie sprzężona z matrycą kamery CCD. W tym celu za filtrem umieszczony jest afokalny układ obrazujący 4F o jednostkowym powiększeniu. Zbudowany jest on z soczewki L_2 oraz dodatkowej soczewki o ogniskowej $F = 200$ mm. W zastosowanej metodzie modulator adresowany jest przez siatki dyfrakcyjne opisane równaniem:

$$\omega = \exp\left(i2\pi(Xf_x + Yf_y)\right), \quad (3-12)$$

o różnych częstotliwościach:

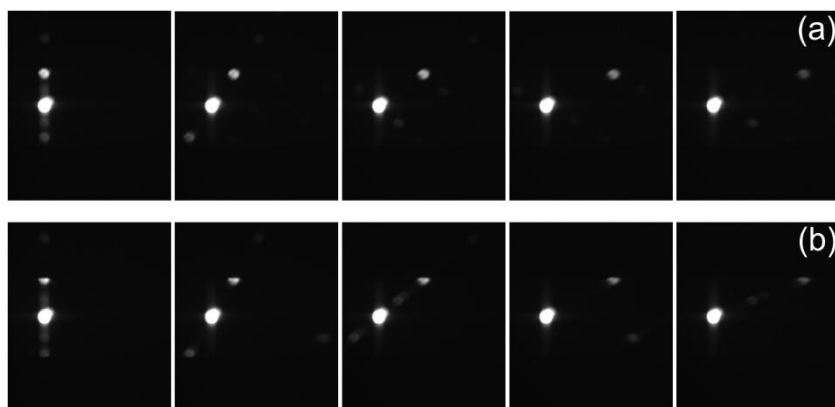
$$f_x = \frac{x}{\lambda_B F_1}, f_y = \frac{y}{\lambda_B F_1}. \quad (3-13)$$

W rezultacie w płaszczyźnie maski widoczne są plamki dyfrakcyjne, których położenie zależy od częstotliwości, dla których zaprojektowana jest wyświetlana siatka. Przykładowe obrazy wyświetlane na modulatorze, wraz z generowanymi w jego płaszczyźnie Fouriera plamkami, przedstawione są na Rys. 3-9.



Rys. 3-9. Przykładowe siatki dyfrakcyjne wyświetlane na modulatorze SLM (górny wiersz) i generowane dla nich plamki dyfrakcyjne w różnych położeniach przestrzennych w płaszczyźnie Fouriera modulatora (dolny wiersz).

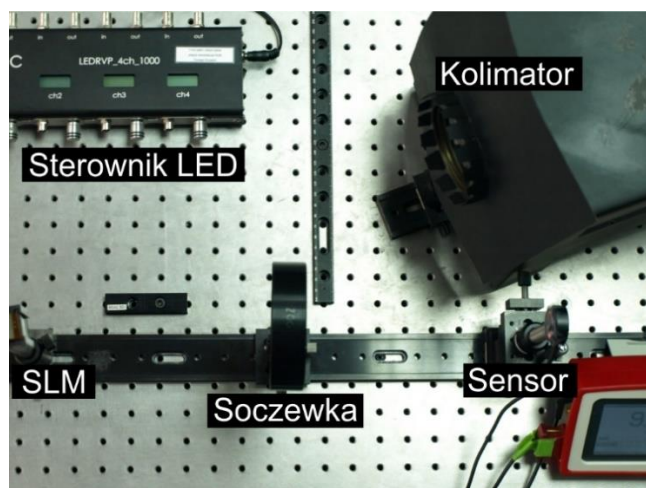
Procedura kalibracji wykonywana jest w dwóch etapach. W pierwszym etapie wykonywane jest zgrubne pozycjonowanie maski. Modulator SLM wyświetla w czasie różne siatki dyfrakcyjne o zerowej częstotliwości przestrzennej f_x i równo zmiennych częstotliwościach f_y . W ten sposób w płaszczyźnie Fouriera modulatora tworzona jest „linia” złożona z wielu plamek dyfrakcyjnych, która wyznacza środkową płaszczyznę jego częstotliwości przestrzennych. Za pomocą trzech stolików liniowych xyz położenie środka maski barwnej pokrywane jest z utworzoną linią. Dodatkowo krawędź filtra ustawiana jest równoległe do niej z wykorzystaniem stolika kąтового. Drugi etap polega na dokładnym zmierzeniu wartości częstotliwości odcięcia dla barwy czerwonej i zielonej. Ponownie obserwowany jest zbiór plamek w płaszczyźnie Fouriera modulatora SLM. W pojedynczym kroku częstotliwość w kierunku pionowym jest stała, a w kierunku poziomym zmienia się w czasie. Powstałe obrazy są rejestrowane na kamerze CCD, a następnie są automatycznie analizowane w programie Matlab. Pomiar zaczyna się od częstotliwości f_x , która na pewno znajduje się wewnątrz filtra niebieskiego. Rys. 3-10(a) przedstawia zarejestrowane obrazy. Dzięki temu wyznaczane są maksymalne intensywności plamek dla każdej częstotliwości f_y . Następnie częstotliwość w kierunku pionowym jest zwiększana, dopóki intensywność rejestrowanej plamki jest większa od połowy wartości maksymalnej. Krok ten jest przedstawiony na Rys. 3-10(b). W rezultacie znajdowana jest częstotliwość odcięcia filtra czerwonego. Analogicznie zmniejszając w pętli częstotliwość f_x wyznaczana jest częstotliwość odcięcia dla filtra niebieskiego. Precyzyjne położenie maski pozwala na zminimalizowanie efektu wyciekania barw, który omówiony jest w rozdziale 3.9.



Rys. 3-10. Zestaw plamek dyfrakcyjnych obserwowanych na kamerze CCD pozwalający na wyznaczeniu wartości częstotliwości odcięcia kanału R w a) pierwszym kroku i b) ostatnim kroku procedury kalibracyjnej.

3.7. Wydajność dyfrakcyjna zaproponowanej metody

Wykorzystywany w układzie wyświetlacza fazowy modulator SLM pozwala na uzyskanie modulacji wiązki oświetlającej z wydajnością dyfrakcyjną sięgającą 100 %. Jednak zastosowana metoda kodowania zespolonego wykorzystuje filtrację rzędów dyfrakcyjnych urządzenia z zastosowaniem filtra absorpcyjnego, który umieszczony jest w jego płaszczyźnie Fouriera. Przepuszcza on tylko pierwszy rząd dyfrakcyjny usuwając wszystkie pozostałe. Z tego powodu wydajność wyświetlacza nie może być większa niż 50 %.



Rys. 3-11. Zdjęcie układu pomiarowego wykorzystywanego do zmierzenia wydajności dyfrakcyjnej systemu barwnego wyświetlacza holograficznego.

W niniejszej pracy wydajność dyfrakcyjna zaproponowanego układu wyświetlacza mierzona jest eksperymentalnie. Podczas analizy pomijany jest efekt spadku wydajności spowodowany przez elementy optyczne. Metoda bazuje na pomiarze intensywności rzędów

dyfrakcyjnych uzyskanych w układzie przedstawionym na Rys. 3-11. Składa się on z diody światła białego, kolimatora, fazowego modulatora SLM, soczewki realizującej transformatę Fouriera i sensora mocy. W pierwszym kroku procedury pomiarowej wyznaczana jest całkowita moc światła odbitego od powierzchni modulatora. W tym celu wykonywany jest pomiar mocy rzędów zerowych panelu SLM pracującego jako zwierciadło. Moc dla każdej ze składowych RGB mierzona jest osobno przez wstawienie w sekwencji czasu odpowiedniego filtra za soczewkę kolimującą. Zmierzone wartości wynoszą: $I_{0R} = 20,3 \mu\text{W}$, $I_{0G} = 3,5 \mu\text{W}$ oraz $I_{0B} = 7,9 \mu\text{W}$. W drugim kroku mierzona jest moc w pierwszych rzędach dyfrakcyjnych modulatora dla każdej ze składowych. Na modulatorze wyświetlany jest hologram testowy, który zaprojektowany jest w taki sposób, żeby na odległości rekonstrukcji równej $z_{rec} = 0 \text{ mm}$ zrekonstruować trzy obrazy RGB o jednorodnym rozkładzie amplitudy. Zmierzone wartości to: $I_{1R} = 1,5 \mu\text{W}$, $I_{1G} = 0,4 \mu\text{W}$, $I_{1B} = 1,1 \mu\text{W}$. Następnie z równania:

$$Q_p = \frac{I_{1p}}{I_{0p}} \cdot 100\% \quad (3-14)$$

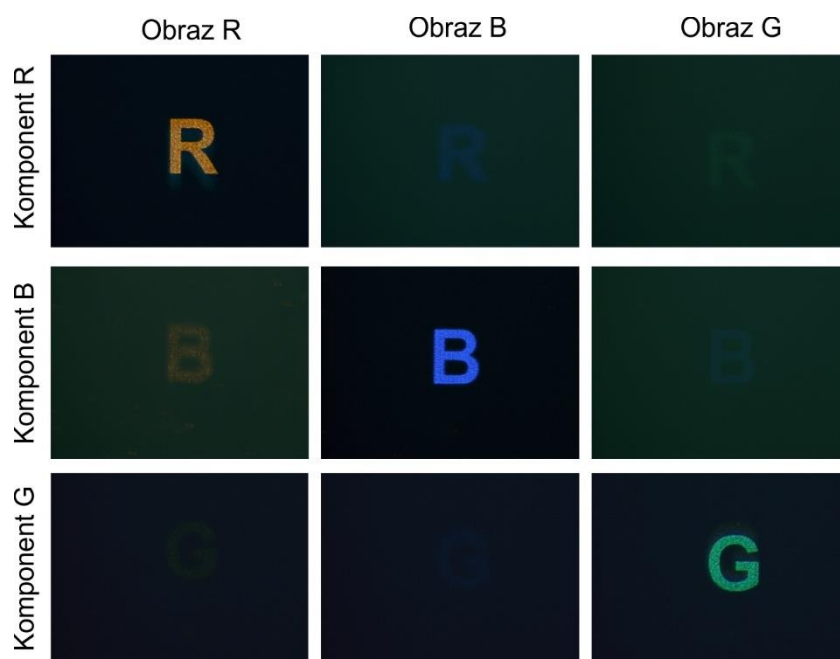
wyznaczana jest wydajność dyfrakcyjna wyświetlacza dla każdego kanału RGB. Dla uzyskanych rezultatów wynosi ona kolejno: $Q_R = 7,4 \%$, $Q_G = 11,4 \%$ oraz $Q_B = 13,9 \%$.

3.8. Balans bieli

W opracowanym układzie wyświetlacza składowe obrazy RGB rekombinują ze sobą tworząc barwny obiekt. W celu prawidłowego odwzorowania barwy białej, wszystkie komponenty RGB powinny mieć taką samą intensywność. Jednak w zbudowanym systemie moce składowych różnią się od siebie. Jest to spowodowane właściwościami transmisyjnymi filtrów RGB oraz charakterystyką spektralną źródła światła białego. Na Rys. 3-3(b) zamieszczono wykres zmierzonych za pomocą spektrometru intensywności kanałów RGB. Wyniki pokazują, że najniższa uzyskiwana jest dla kanału zielonego, a najwyższa dla czerwonego. Opracowana w pracy metoda multipleksingu częstotliwościowego pozwala na kontrolę mocy barwnych komponentów w płaszczyźnie rekonstrukcji. Realizowana jest ona przez dostosowanie wartości współczynnika korekcyjnego M_p , dla każdego z kanałów RGB, podczas generacji hologramu. Żeby zapewnić prawidłową rekonstrukcję barwy białej wartości M_p znajdowane są eksperymentalnie. W tym celu hologram światła białego, wygenerowany z obiektu testowego w postaci kwadratu o stałej i równej amplitudzie dla każdego z kanałów RGB, rekonstruowany jest w układzie wyświetlacza. Następnie współczynniki M_R , M_G i M_B zmieniają się aż do uzyskania prawidłowej barwy białej. Znalezione wartości wynoszą kolejno $M_R = 0,42$, $M_G = 1$ oraz $M_B = 0,82$.

3.9. Efekt wyciekania barw

Podczas rekonstrukcji może zdarzyć się tak, że barwny komponent zaprojektowany dla danego filtra rekonstruowany jest przez sąsiedni. Jeżeli składowy hologram rekonstruowany jest przez więcej niż jeden filtr dochodzi do efektu wyciekania barw. Może być on spowodowany dwoma czynnikami. Pierwszym jest niepokrywanie się zakresu częstotliwości barwnych komponentów RGB zakodowanych w hologramie światła białego z położeniem przestrzennym maski barwnej. Drugim jest powstawanie wyższych rzędów dyfrakcyjnych.



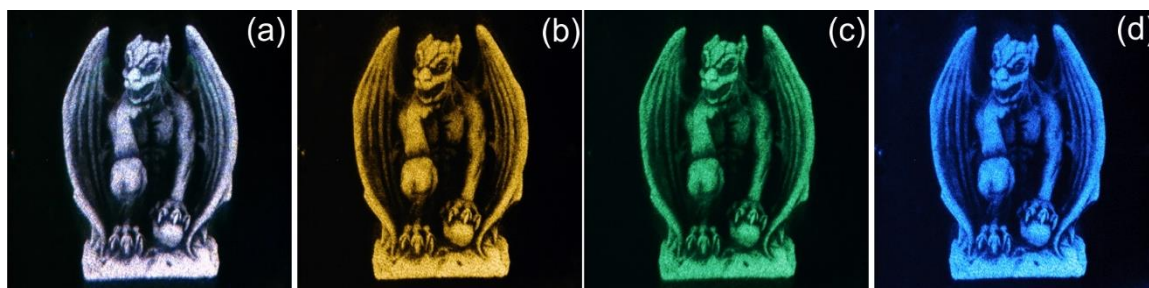
Rys. 3-12. Optyczne rekonstrukcje barwnych komponentów RGB (wiersze) i zarejestrowane dla każdego z nich trzy barwne obrazy (kolumny).

Efekt wyciekania barw został eksperymentalnie przeanalizowany poprzez wyświetlenie na modulatorze SLM trzech hologramów. Każdy zaprojektowany jest dla innej centralnej długości fali składowych RGB. Obiektami testowymi są zdjęcia 2D przedstawiające litery „R”, „G” i „B”. Dla każdego zrekonstruowanego komponentu rejestrowane są trzy obrazy RGB na kamerze CCD. Uzyskiwane są one przez wstawienie w układzie wyświetlacza filtrów spektralnych za soczewką K. Wyniki przedstawione są na Rys. 3-12. Kolumny oznaczają zarejestrowane barwy, wiersze barwne komponenty. Lewe górne zdjęcie pokazuje wyniki rekonstrukcji czerwonego komponentu przechodzącego przez czerwony filtr. Środkowe górne demonstruje, ile intensywności czerwonej składowej wycieka do filtra w kolorze niebieskim itd. Z wyników można zaobserwować, że wyciekanie barw widoczne jest najmocniej dla rekonstrukcji niebieskiego komponentu przez czerwony filtr. Dla innych przypadków efekt ten

jest niezauważalny. Dlatego w przeprowadzonej analizie porównano intensywność kanału czerwonego i intensywność kanału niebieskiego zrekonstruowanego przez czerwony filtr. Wynik jest mniejszy niż 1%. Z tego powodu można uznać, że efekt wyciekania barw może być pominięty.

3.10. Optyczne rekonstrukcje obiektów 2D i 3D

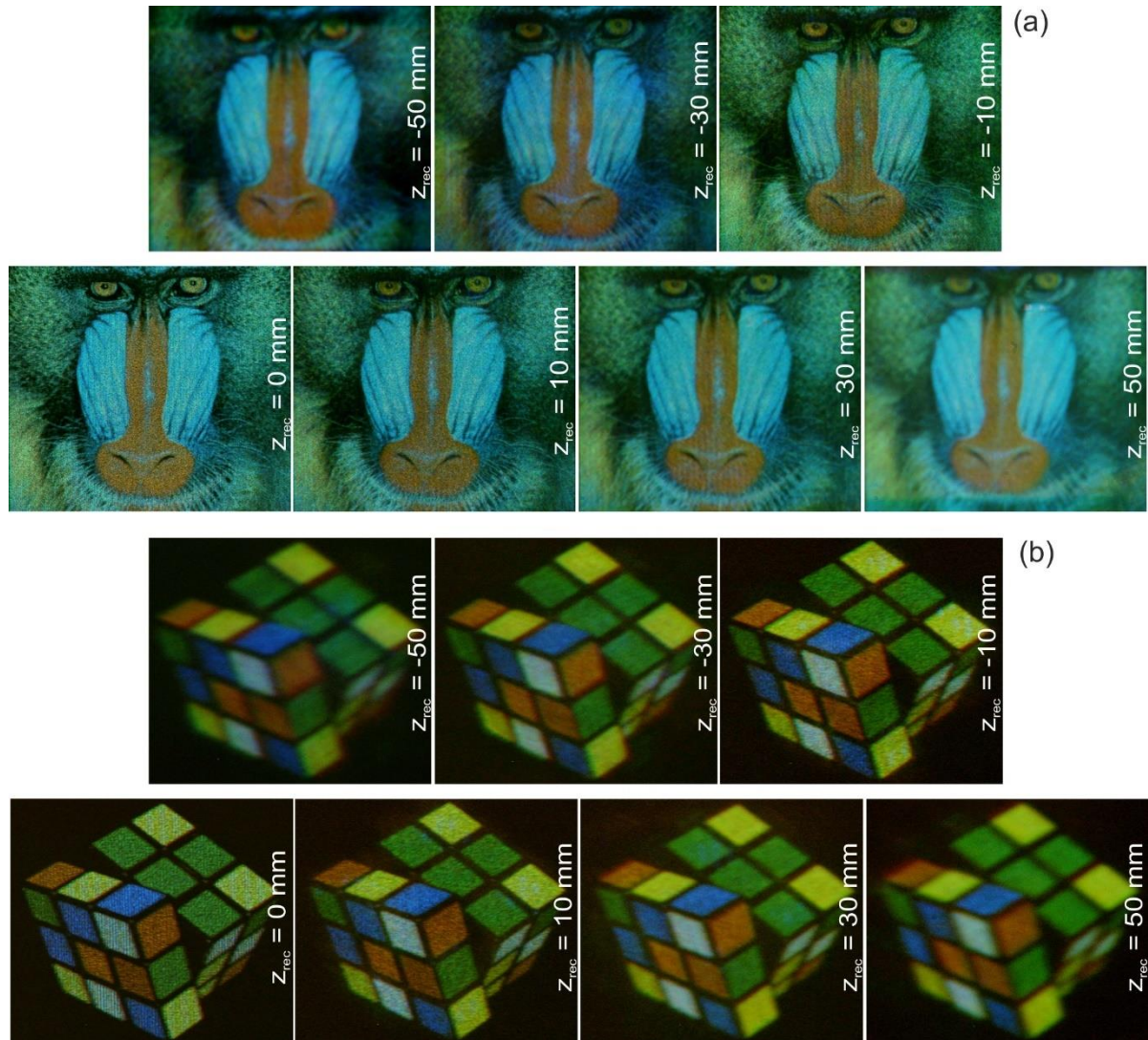
W rozdziale tym zamieszczone są wyniki optycznych rekonstrukcji barwnych obiektów 2D i 3D uzyskanych w zbudowanym wyświetlaczu holograficznym. Ilustracja odwzorowania barwy oraz jakości obrazowania przedstawiona jest w trzech eksperymentach. Pierwszy udowadnia, że opracowana metoda umożliwi uzyskanie prawidłowego balansu bieli. Drugi demonstruje jakość obrazowania oraz analizuje głębię rekonstrukcji przedmiotów 2D reprezentowanych przez wielobarwne zdjęcia. Trzeci potwierdza, że zaprezentowany system pozwala na odtworzenie barwnych obiektów 3D. We wszystkich eksperymentach fazowy modulator SLM wyświetla zespolony hologram światła białego, który generowany jest z zastosowaniem algorytmu opisanego w rozdziale 3.5. Optyczne rekonstrukcje rejestrowane są bezpośrednio na kamerze CCD umieszczonej w płaszczyźnie obrazu.



Rys. 3-13. Optyczna rekonstrukcja zdjęcia przedstawiającego gargulca uzyskana dla (a) diody światła białego oraz filtrów (b) R, (c) G, (d) B.

W pierwszym eksperymencie rozpatrywany jest amplitudowy obiekt 2D umieszczony w odległości $z_{rec} = 10$ mm od modulatora SLM. Przedmiotem testowym jest szaro-odcieniowe zdjęcie przedstawiające gargulca. Propagacja pomiędzy płaszczyzną obiektu, a płaszczyzną hologramu realizowana jest z zastosowaniem metody rozkładu na fale płaskie (ang. *Angular Spectrum Method*) [60]. Technika wykonywana jest w dwóch krokach. W pierwszym transformata Fouriera wejściowego pola optycznego mnożona jest z funkcją przenoszenia wolnej przestrzeni. W drugim wyznaczana jest odwrotna transformata Fouriera uzyskanego wyniku. W rezultacie otrzymywane jest pole optyczne w płaszczyźnie hologramu. Wyniki optycznych rekonstrukcji rozpatrywanego obiektu przedstawione są na Rys. 3-13. Na

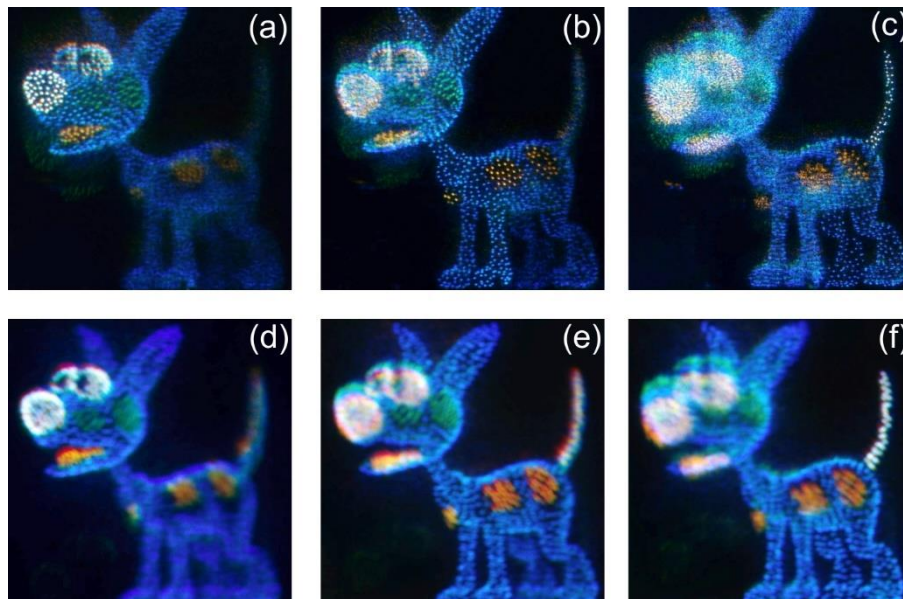
Rys. 3-13(a) zamieszczono rezultat uzyskany dla diody światła białego, natomiast na Rys. 3-13(b), (c) i (d) zaprezentowane są otrzymane obrazy dla każdego kanału RGB.



Rys. 3-14. Optyczne rekonstrukcje wielobarwnego zdjęcia (a) małpy oraz (b) kostki Rubika uzyskane z wykorzystaniem metody multipleksingu częstotliwościowego, zarejestrowane dla różnej odległości rekonstrukcji.

W drugim eksperymencie danymi wejściowymi są wielobarwne płaskie obiekty w postaci dobrze znanych zdjęć małpy i kostki Rubika. Hologramy obu przedmiotów generowane są dla różnych odległości: -50 mm, -30 mm, -10 mm, 0 mm, 10 mm, 30 mm i 50 mm. Uzyskane wyniki optycznych rekonstrukcji przedstawione są na Rys. 3-14. Zarejestrowane rezultaty dowodzą, że opracowany system wyświetlacza holograficznego z maską barwną umożliwia uzyskanie wysokiej jakości barwnych obrazów. W przedstawionym rozwiązaniu głębia rekonstrukcji ograniczona jest przez stopień koherencji źródła światła użytego w układzie

wyświetlacza. Dla rozpatrywanego systemu zbudowanego z powiększeniem 1:1 wynosi ona ± 50 mm.



Rys. 3-15. Optyczne rekonstrukcje obiektu 3D złożonego z chmury punktów zrekonstruowanego (a), (b), (c) blisko oraz (d), (e), (f) daleko od płaszczyzny modulatora SLM uzyskane z wykorzystaniem metody multipleksingu częstotliwościowego. Dla obu przypadków kamera zogniskowana jest na różne fragmenty modelu psa: (a), (d) nos, (b), (e) szyja z łańcuszkiem oraz (c), (f) ogon.

Trzeci eksperyment przeprowadzony jest dla komputerowego modelu w postaci trójwymiarowej chmury punktów. Przedstawia on niebieskiego psa z białym nosem, oczami i ogonem, czerwonym językiem i dwoma łatami na boku, dwoma zielonymi łatami na pysku oraz żółtym łańcuszku zawieszonym na szyi. Obiekt 3D składa się z 2000 punktów i ma wymiary: 10 mm szerokości, 8 mm wysokości oraz 16 mm głębokości. Składowe hologramy RGB generowane są z wykorzystaniem metody opisanej w [61]. W technice tej każdy punkt przedmiotu traktowany jest jako źródło fali sferycznej. Wszystkie wiązki propagowane są do płaszczyzny hologramu na odległość z_{rec} , a następnie sumowane. Na Rys. 3-15 przedstawione są wyniki optycznych rekonstrukcji modelu psa umieszczonego w różnych odległościach od płaszczyzny modulatora. Rys. 3-15(a), (b) i (c) pokazują obrazy zarejestrowane dla przedmiotu, którego płaszczyzna środkowa w kierunku wzdłużnym rekonstruowana jest w odległości 10 mm. W celu zademonstrowania możliwości obrazowania 3D kamera umieszczona jest w trzech różnych położeniach wzdłuż osi z . Odpowiadają one różnym płaszczyznom obiektu, w których ostro odwzorowany jest kolejno: nos, szyja z łańcuszkiem oraz ogon. Uzyskane wyniki charakteryzuje wysoka jakość oraz precyzyjne odwzorowanie barwy. Rys. 3-15(d),

(e) i (f) ilustrują wyniki uzyskane dla analogicznych płaszczyzn ostrości przedmiotu, ale dla przypadku, w którym jego środek znajduje się w odległości 50 mm od matrycy SLM. Podobnie jak w przypadku obiektów 2D wraz z odległością rekonstrukcji jakość obrazowania spada. Jednak geometria obiektu jest wciąż widoczna, a jego barwy dobrze odtworzone.

3.11. Dyskusja wpływu koherencji źródła światła na jakość obrazowania w systemie wyświetlacza

W przedstawionym systemie wyświetlacza holograficznego jako źródło światła wykorzystywana jest biała dioda LED o dużym rozmiarze, która charakteryzuje się niskim stopniem koherencji czasowej i przestrzennej. Ponieważ system zbudowany jest w konfiguracji holografii obrazowej możliwa jest rekonstrukcja obiektu w płaszczyźnie modulatora SLM. W płaszczyźnie tej rozdzielczość rekonstruowanych obrazów jest niezależna od stopnia koherencji źródła światła. Jednak wraz ze wzrostem odległości rekonstrukcji jakość spada, co zostało udowodnione eksperymentalnie w rozdziale 3.10. W niniejszym rozdziale przeprowadzona jest dyskusja wpływu koherencji przestrzennej i czasowej na rozdzielczość rekonstrukcji holograficznej.

Wpływ koherencji przestrzennej może być przedstawiony jako operacja liniowej filtracji częstotliwości przestrzennych przedmiotu przez funkcję filtracji charakteryzowaną przez stopień koherencji przestrzennej źródła światła:

$$I(r) = \int \tilde{g}\left(\frac{r}{\lambda z}, \lambda\right) \otimes I_{coh.}(r) d\lambda, \quad (3-15)$$

gdzie $I(r)$ oznacza intensywność w płaszczyźnie rekonstrukcji, r oznacza współrzędne płaszczyzny rekonstrukcji, g oznacza stopień koherencji, I_{coh} rekonstrukcję uzyskaną dla koherentnego źródła. Efekt koherencji czasowej może być opisany jako wynik superpozycji obrazów otrzymanych dla różnych komponentów spektralnych. Analiza numeryczna wpływu koherencji źródła światła na jakość rekonstrukcji znajduje się w pracy [62].

Ostrość zrekonstruowanego obrazu oraz poziom szumu plamkowego zależą zarówno od koherencji przestrzennej jak i czasowej. Wyniki eksperymentalne uzyskane w artykule [62] oraz analizy wykonane w innych publikacjach [49 - 51] pokazują, że efekt koherencji przestrzennej źródła światła ma większy wpływ na rozdzielczość rekonstruowanych obrazów. Podobnie jest w rozpatrywanym wyświetlaczu holograficznym. Efekt koherencji przestrzennej może być w nim rozumiany jako filtracja dolnoprzepustowa o częstotliwościach odcięcia 42 mm^{-1} na odległości 10 mm oraz $8,3 \text{ mm}^{-1}$ na odległości 50 mm. Dla źródła światła

o wymiarze 960 μm powstaje prawie pięciokrotny spadek częstotliwości odcięcia w odległości 40 mm.

3.12. Podsumowanie

System wyświetlacza holograficznego zaproponowany w pracy umożliwia uzyskanie wysokiej jakości barwnych rekonstrukcji obiektów 2D i 3D z pojedynczego zespolonego hologramu światła białego. Rekonstrukcja barwy realizowana jest z wykorzystaniem opracowanej metody multipleksingu częstotliwościowego, która pozwala na uzyskanie obrazu z pełnym wykorzystaniem częstotliwości wyświetlania fazowego modulatora SLM. Technika składa się z dwóch etapów. W pierwszym barwa przedmiotu kodowana jest w zespolonym hologramie światła białego. W drugim jest ona dekodowana za pomocą maski barwnej umieszczonej w płaszczyźnie Fouriera modulatora SLM, który oświetlony jest białą diodą LED.

System wyświetlacza umożliwia odtworzenie zespolonej amplitudy obiektu z wykorzystaniem schematu kodowania zespolonego ze zlinearyzowaną odpowiedzią amplitudową. Metoda ta pozwala na uzyskanie konfiguracji systemu, w której objętość rekonstrukcji zlokalizowana jest wokół płaszczyzny modulatora SLM. Taka konstrukcja układu jest optymalna w wyświetlaczu holograficznym zbudowanym z niekoherentnym źródłem światła. Dzięki temu opracowana technika umożliwia uzyskanie wysokiej rozdzielczości obrazów w płaszczyznach znajdujących się blisko powierzchni modulatora. Głębina rekonstrukcji uzależniona jest w głównej mierze od koherencji przestrzennej źródła światła. W omówionym układzie wyświetlacza zrealizowanego z diodą światła białego i powiększeniem 1:1 wynosi ona około 100 mm.

4. Barwny wyświetlacz holograficzny z oknem obserwacji i oświetleniem niekoherentnym

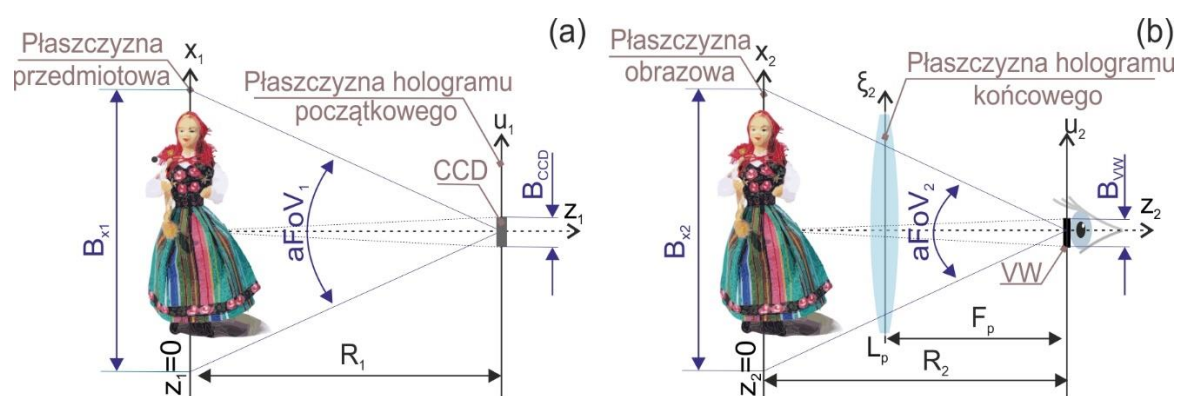
Wyświetlacz holograficzny powinien zapewniać rekonstrukcję dużego, atrakcyjnego przedmiotu oraz jego komfortową obserwację. Przedstawiony w poprzednim rozdziale barwny wyświetlacz holograficzny z diodą światła białego pozwala na uzyskanie wysokiej jakości obrazów 2D i 3D. Jednak rozmiar rekonstruowanego w nim obiektu jest mały, ponieważ ściśle zależy od wymiarów użytego modulatora SLM. Żeby móc uznać odtworzony obraz za atrakcyjny, powinien być on zwiększony. Efektywnym rozwiązaniem umożliwiającym odtworzenie dużego przedmiotu, który może być obserwowany gołym okiem, jest budowa wyświetlacza holograficznego z oknem obserwacji [44, 48]. W metodzie tej rozmiar przedmiotu zwiększany jest z wykorzystaniem układu obrazującego 4F. W płaszczyźnie rekonstrukcji obiektu umieszczona jest soczewka polowa, która generuje w swoim ognisku okno obserwacji. W tej płaszczyźnie wymiar wiązki obiektowej jest najmniejszy. Skupione są w nim promienie z wszystkich punktów przedmiotu. W rezultacie każdy punkt obiektu 3D ma swoją reprezentację w odpowiednim punkcie w oknie obserwacji. Gdy użytkownik umieści w nim oko może zobaczyć cały odtworzony przedmiot. Poza tym obszarem rekonstrukcja jest niewidoczna.

Istotnym parametrem wyświetlacza holograficznego jest możliwość rekonstrukcji dużych obiektów rzeczywistych. Przedstawiony w tym rozdziale system wyświetlacza holograficznego z oknem obserwacji i oświetleniem niekoherentnym pozwala na odtworzenie takich przedmiotów w dowolnym położeniu i skali. Uzyskane w nim optyczne rekonstrukcje, charakteryzujące się wysoką jakością i dużą głębią, mogą być obserwowane gołym okiem. Opis metody opracowanej do realizacji pełnego obrazowania holograficznego został opublikowany w artykule [63]. Technika wykorzystuje dane pozyskane w bezsoczewkowym układzie rejestracji Fouriera [64, 65] oraz system wyświetlacza holograficznego z oknem obserwacji, który zmodyfikowany jest o nową ścieżkę przetwarzania umożliwiającą modyfikację geometrii rzeczywistych obiektów. Mogą one być zrekonstruowane na dowolnej odległości od modulatora, przesunięte w swojej płaszczyźnie, jak również powiększone. Cała ścieżka obrazowania holograficznego zrealizowana jest w geometrii Fouriera, co pozwala na pełne wykorzystanie SBP urządzeń zastosowanych do rejestracji i rekonstrukcji hologramów [66]. Taka konfiguracja otrzymywana jest w układzie wyświetlacza z użyciem soczewki polowej.

W opracowanym rozwiązaniu modulator SLM adresowany jest przez pole obiektowe z usuniętym fazowym członem sferycznym, który jest dodawany przez soczewkę polową.

4.1. Koncepcja holograficznego obrazowania Fouriera

Rysunek 4-1 pokazuje zaproponowany w pracy schemat holograficznego obrazowania Fouriera. Metoda wykorzystuje dane zarejestrowane w bezsoczewkowym układzie rejestracji Fouriera, algorytm propagacji konfokalnej oraz zmodyfikowany układ wyświetlacza holograficznego z oknem obserwacji i niekoherentnym źródłem LED. Opracowane rozwiązanie pozwala na uzyskanie barwnych rekonstrukcji dużych, rzeczywistych obiektów 3D w dowolnym położeniu i rozmiarze. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu numerycznego przetwarzania danych holograficznych i budowie wyświetlacza w konwencji geometrii Fouriera, która bazuje na rejestracji, przetwarzaniu i rekonstrukcji wiązki przedmiotowej z usuniętym członem sferycznym.



Rys. 4-1. Schemat koncepcji obrazowania holograficznego w konwencji Fouriera

(a) układ rejestracji (b) układ rekonstrukcji.

Pełne obrazowanie holograficzne realizowane jest w trzech krokach. W pierwszym tworzony jest cyfrowy hologram rzeczywistego przedmiotu. Zapis wykonywany jest w bezsoczewkowym układzie rejestracji Fouriera, który zilustrowany jest schematycznie na Rys. 4-1(a). W płaszczyźnie przedmiotowej systemu umieszczone są: obiekt oraz punktowe źródło światła. W odległości R_1 od przedmiotu, w płaszczyźnie hologramu początkowego, znajduje się kamera CCD. Rejestruje ona interferogram będący wynikiem nakładania się na siebie wiązki przedmiotowej O i sprzężonej wiązki referencyjnej R^* :

$$OR^*(u_1) = O_c(u_1, -R_1) = O(u_1) \exp \left[\frac{-ik_{n1}u_1}{2R_1} \right], \quad (4-1)$$

gdzie indeks 1 określa układ rejestracji, indeks n długość fali użytego źródła światła, a $O_c(u_1, -R_1)$ oznacza wiązkę przedmiotową O z usuniętym członem sferycznym o promieniu krzywizny R_1 . W związku z tym, że w płaszczyźnie obiektu znajduje się punktowe źródło światła, hologram cyfrowy zawiera transformatę Fouriera wiązki obiektowej z płaszczyzny x_1 . Dlatego rekonstrukcja pola optycznego $O_c(x_1, R_1)$ opisana jest równaniem:

$$FT[O_c(u_1, -R_1)] = O_c(x_1, R_1) = O(x_1) \exp\left[\frac{ik_{n1}x_1^2}{2R_1}\right]. \quad (4-2)$$

Z wzoru wynika, że SBP wiązki z usuniętym członem sferycznym w płaszczyźnie hologramu i obrazu jest takie samo i równa się liczbie pikseli zarejestrowanego hologramu. Cyfrowe hologramy obiektów rzeczywistych wykorzystane w mojej pracy udostępnione zostały przez mgr inż. Weronikę Zaperty.

W drugim kroku dane są przetwarzane numerycznie z płaszczyzny hologramu początkowego do płaszczyzny hologramu końcowego, która jest optyczną, powiększoną kopią modulatora SLM. Dzięki zastosowaniu opracowanej metody konfokalnej propagacji Fresnela, opublikowanej w artykule [63], w połączeniu z algorytmem umożliwiającym modyfikację geometrii zarejestrowanego obiektu [67] (udostępnionego przez dr inż. Piotra Makowskiego), rzeczywisty przedmiot może być zrekonstruowany w dowolnej odległości i pozycji, bez spadku jakości obrazowania. Metoda generacji hologramu wyświetlanego na modulatorze SLM opisana jest w rozdziale 4.3.

W trzecim kroku obiekt jest optycznie rekonstruowany w układzie wyświetlacza holograficznego z oknem obserwacji i oświetleniem niekoherentnym. Odtworzony przedmiot może być obserwowany przez użytkownika gołym okiem. Schemat powstawania obrazu, podobnie jak jego zapisu, bazuje na konfiguracji Fouriera. Zaprezentowany jest on na Rys. 4-1(b). W systemie wyświetlacza modulator SLM adresowany jest przez hologram wiązki obiektowej z usuniętym członem sferycznym. Krzywizna wiązki przedmiotowej dodawana jest przez soczewkę polową L_p umieszczoną w płaszczyźnie hologramu końcowego. W efekcie wiązka odtwarzająca przedmiot jest sferyczną falą zbieżną, która jest analogiczna do fali rejestrującej z Rys. 4-1(a). Soczewka L_p tworzy okno obserwacji VW w swoim ognisku. Z Rys. 4-1 widać, że płaszczyzny u_1 i u_2 , będące Fourierowskim odpowiednikiem płaszczyzny obiektu i obrazu, są ze sobą sprzężone. Wymiar okna obserwacji wyrażony jest równaniem:

$$B_{VW} = \frac{\lambda_2 F_p}{\Delta \xi_2} = \frac{\lambda_2 R_2 B_{CCD}}{m_D \lambda_1 R_1}, \quad (4-3)$$

gdzie Δ_{ξ_2} jest wymiarem piksela powiększonego modulatora SLM w płaszczyźnie ξ_2 , λ_1 i λ_2 są długościami fal użytymi w układzie rejestracji i rekonstrukcji, B_{CCD} jest wymiarem kamery, a m_D jest cyfrowym powiększeniem poprzecznym obrazu. Wiązka rejestrująca i rekonstruująca mają wspólny punkt zbieżny. Dlatego obserwacja obrazu przez użytkownika jest analogiczna do widoków zapisywanych na kamerze CCD.

Układ rejestracji i rekonstrukcji są od siebie niezależne. Obiekt 3D może być odtworzony w wyświetlaczu holograficznym w dowolnej odległości R_2 . Gdy odległość ta jest równa odległości rejestracji R_1 uzyskuje się holograficzną kopię obiektu o niezmiennych wymiarach. Natomiast dla $R_1 \neq R_2$ płaszczyzna hologramu końcowego, która jest sprzężoną i powiększoną płaszczyzną modulatora SLM, nie pokrywa się z płaszczyzną obrazu. Rekonstruowany jest wtedy przedmiot o zmienionej geometrii 3D.

Pomimo wielu podobieństw między geometrią układu rejestracji i rekonstrukcji, uzyskanie obrazowania całego przedmiotu 3D bez deformacji, nie zawsze jest możliwe. Różnice pomiędzy długościami fal λ_1 i λ_2 oraz promieniami krzywizny R_1 i R_2 stosowanymi w obu układach, jak również wprowadzenie cyfrowego powiększenia poprzecznego obrazu m_D , skutkuje powstawaniem zmiany geometrii odtworzonego obiektu. Wpływ wymienionych czynników na jakość zrekonstruowanego obrazu omówiona jest w rozdziale 4.5.

Układ rejestracji i rekonstrukcji mogą mieć różną wartość kąta pola widzenia $aFoV$ (ang. *angular field of view*). Gdy $aFoV_2 > aFoV_1$ cały obiekt 3D może być obserwowany gołym okiem. W odwrotnym przypadku obraz przedmiotu jest przycięty. Kąt pola widzenia układu rejestracji definiowany jest przez wymiar piksela kamery CCD zgodnie z równaniem:

$$aFoV_1 = \frac{\lambda_1}{\Delta_{u1}} = \frac{B_{x1}}{R_1}, \quad (4-4)$$

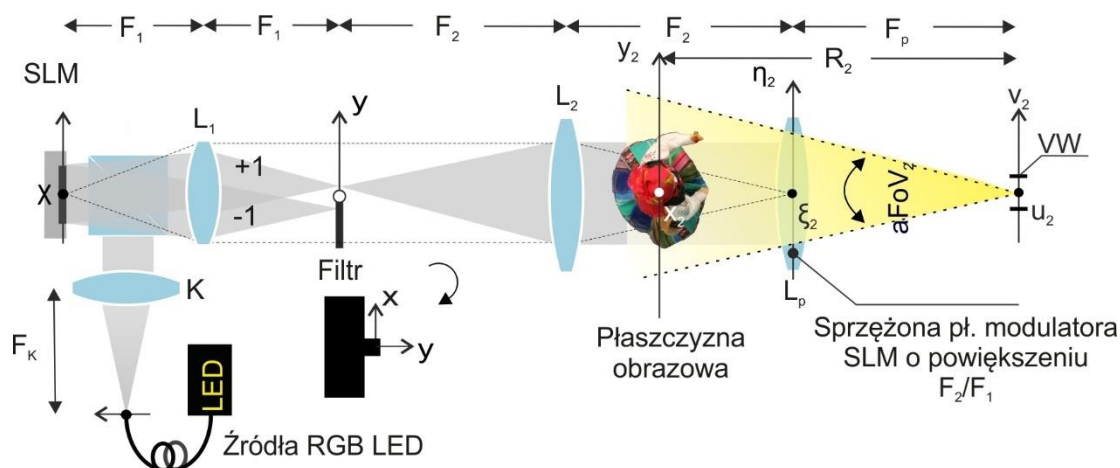
gdzie B_{x1} jest maksymalnym wymiarem obiektu w płaszczyźnie x_1 , a Δ_{u1} oznacza wymiar piksela modulatora w płaszczyźnie u_1 . Kąt pola widzenia układu rekonstrukcji jest natomiast zależny od ogniskowej soczewki polowej F_p oraz wymiaru obrazu modulatora SLM B_{ξ_2} :

$$aFoV_2 = \frac{B_{\xi_2}}{F_p} = \frac{B_{x2}}{R_2}, \quad (4-5)$$

gdzie B_{x2} określa maksymalny wymiar rekonstruowanego obrazu w płaszczyźnie x_2 .

4.2. Budowa wyświetlacza holograficznego z oknem obserwacji i oświetleniem niekoherentnym

Cyfrowy hologram Fouriera, zarejestrowany w geometrii zaprezentowanej na Rys. 4-1(a), rekonstruowany jest w wyświetlaczu z oknem obserwacji przedstawionym na Rys. 4-2. Układ składa się z modułu oświetlającego i obrazującego. Pierwszy moduł wykorzystuje trzy niekoherentne źródła światła RGB typu LED (Doric LEDs, długości fali $\lambda_{R2} = 635$ nm, $\lambda_{G2} = 515$ nm, $\lambda_{B2} = 465$ nm, średnica rdzenia światłowodu $960 \mu\text{m}$) oraz pojedynczy fazowy modulator (Holoeye 1080P, wymiar piksela $\Delta = 8 \mu\text{m}$, rozdzielczość 1920×1080). Panel SLM oświetlony jest falą płaską utworzoną przez źródło światła umieszczone w płaszczyźnie ogniskowej soczewki kolimującej K ($F_K = 400$ mm). Wyświetla on cyfrowy hologram Fouriera, w którym zakodowana jest zespolona amplituda przedmiotu z usuniętym członem sferycznym. Metoda generacji hologramu opisana jest szczegółowo w rozdziale 4.3. Wiązka odbita od SLM przechodzi przez moduł obrazujący, który zapewnia powiększenie obrazu, dekodowanie zespolone oraz uzyskanie geometrii układu w konwencji holografii Fouriera. Pierwsza operacja realizowana jest z zastosowaniem układu afokalnego 4F złożonego z dwóch soczewek L_1 i L_2 o powiększeniu $m = -6$. Sprzęga on płaszczyznę modulatora SLM z objętością obrazu przedmiotu 3D. W płaszczyźnie Fouriera systemu 4F umieszczony jest filtr absorpcyjny, który eksperymentalnie wspiera numeryczną część kodowania zespolonego. Szczegółowy opis metody rekonstrukcji zespolonego frontu falowego opisany jest w rozdziale 3.4. Geometria holografii Fouriera uzyskiwana jest eksperymentalnie z wykorzystaniem soczewki połowej L_p ($F_p = 600$ mm) położonej w płaszczyźnie hologramu końcowego. Dodaje ona człon sferyczny wiązki obiektowej, który usunięty jest w procesie generacji hologramu oraz skupia rekonstruowaną wiązkę przedmiotową w oknie obserwacji VW. Po wstawieniu oka w utworzonym oknie, użytkownik widzi cały, barwny przedmiot 3D. Maksymalny wymiar odtworzonego obiektu ograniczony jest przez wartość kąta pola widzenia układu rekonstrukcji $aFoV_2$ (równanie (4-5)), które dla barwy niebieskiej wynosi 8.8° . Szerokość przedmiotu w kierunku osi y jest dwukrotnie mniejsza ze względu na pozaosiową geometrię układu rejestracji. Z tego powodu modulator SLM ustawiony jest w konfiguracji pionowej tzn. 1920 pikseli matrycy znajduje się w osi x . Dzięki takiemu rozwiązaniu geometria pozaosiowa nie zmniejsza wydajności systemu. Kątowa rozdzielczość wyświetlacza jest większa od kątowej rozdzielczości ludzkiego oka ($1/60^\circ$). Głębina rekonstruowanych obiektów mierzona jest w metrach.



Rys. 4-2. Budowa układu rekonstrukcji barwnego systemu wyświetlacza holograficznego z oknem obserwacji i oświetleniem niekoherentnym.

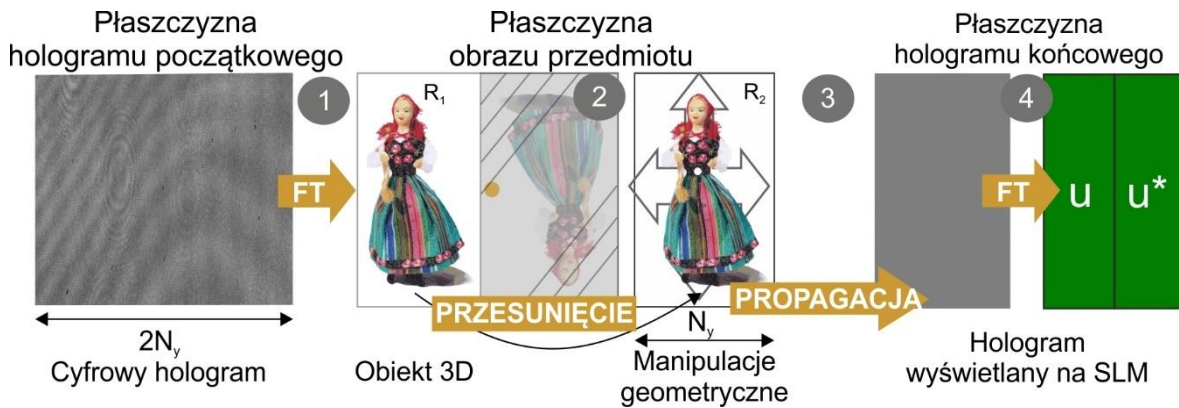
W zbudowanym wyświetlaczu rekonstrukcja barwy może być realizowana z zastosowaniem metody multipleksingu częstotliwościowego lub czasowego. Pierwsze rozwiązanie jest szczegółowo opisane w rozdziale 3. Druga technika polega na wyświetlaniu na modulatorze SLM hologramów wygenerowanych dla składowych RGB przedmiotu w sekwencji czasu. Każdy z nich oświetlany jest przez diodę LED o odpowiedniej barwie. Synchronizacja pomiędzy panelem SLM i źródłami jest możliwa dzięki zastosowaniu sygnału synchronizacyjnego, który generowany jest przez modulator SLM. W metodzie multipleksingu częstotliwościowego obraz uzyskiwany jest z pojedynczego hologramu. Charakteryzuje go trzykrotnie zmniejszona rozdzielczość w kierunku pionowym. Natomiast w drugiej metodzie rekonstruowany jest obiekt o maksymalnej rozdzielczości, ale o trzykrotnie zmniejszonej częstotliwości odświeżania obrazu użytego modulatora. Dlatego barwna rekonstrukcja uzyskiwana jest z częstotliwością 20 Hz.

4.3. Metoda generacji hologramu

Hologram wyświetlany na modulatorze SLM generowany jest z hologramu cyfrowego zapisanego w układzie akwizycji, którego geometria zilustrowana jest na Rys. 4-1(a). Pełna ścieżka przetwarzania pomiędzy płaszczyzną hologramu początkowego, a płaszczyzną hologramu końcowego zawiera cztery kroki. Zilustrowana jest ona schematycznie na Rys. 4-3. W pierwszym kroku wiązka przedmiotowa $O_c(x_1, R_1)$ jest numerycznie rekonstruowana za pomocą transformaty Fouriera. W wyniku przekształcenia powstaje obraz rzeczywisty, rząd zerowy oraz obraz sprzężony. W następnym dwa ostatnie człony są maskowane, a obraz rzeczywisty przesuwany jest do centrum płaszczyzny hologramu. Ponieważ system wyświetlacza holograficznego wykorzystuje geometrię pozaosiową w osi y rozdzielczość

obrazowania w tym kierunku zmniejszona jest w nim o połowę. W celu uniknięcia spadku jakości rekonstrukcji jako dane wejściowe wykorzystywany jest hologram o dwukrotnie większym wymiarze w kierunku poziomym niż wymiar modulatora SLM ($2N_y = 2160$ pikseli).

W tym samym kroku pole $O_c(x_1, R_1)$ przekształcane jest w $O_c(x_2, R_2)$. Położenie przedmiotu i jego obrazu definiowane są przez promienie krzywizny R_1 oraz R_2 powiązanych reprezentacji sygnału z usuniętym członem sferycznym. Dlatego zmiana pozycji obiektu odbywa się bez żadnych dodatkowych operacji. Czynione jest założenie, że obiekt z R_1 rekonstruowany jest przez wiązkę z R_2 . Jeśli wartość R_2 jest różna od R_1 powstaje obraz przedmiotu o zmienionej geometrii.



Rys. 4-3. Schemat metody generacji hologramu.

W trzecim kroku pole optyczne $O_c(x_2, R_2)$ propagowane jest numerycznie do płaszczyzny ξ_2 będącej powiększoną kopią modulatora SLM. W tym celu wykorzystywana jest opracowana metoda propagacji konfokalnej Fresnela dla wiązek zbieżnych i rozbieżnych. Szczegółowy opis działania algorytmu znajduje się w publikacji [63]. Numeryczna realizacja metody składa się z trzech etapów: (i) wyznaczenia transformaty Fouriera pola optycznego $O_c(x_2, R_2)$ z usuniętym członem sferycznym, (ii) mnożenia przez paraboliczny czynnik fazowy oraz (iii) wyznaczenia odwrotnej transformaty Fouriera. Danymi wyjściowymi algorytmu jest pole optyczne $O_c(\xi_2, F_p)$. Rozpatrywane wiązki sferyczne mają wspólny punkt zbieżny w płaszczyźnie okna obserwacji u_2 . Z tego powodu odległość propagacji wynosi $R_2 - F_p$. Ze względu na konfokalność układu wyświetlacza zależność między okresem próbkowania Δ w płaszczyźnie x_2 oraz ξ_2 opisana jest równaniem:

$$\Delta_{\xi_2} = F_p R_2^{-1} \Delta_{x_2}. \quad (4-6)$$

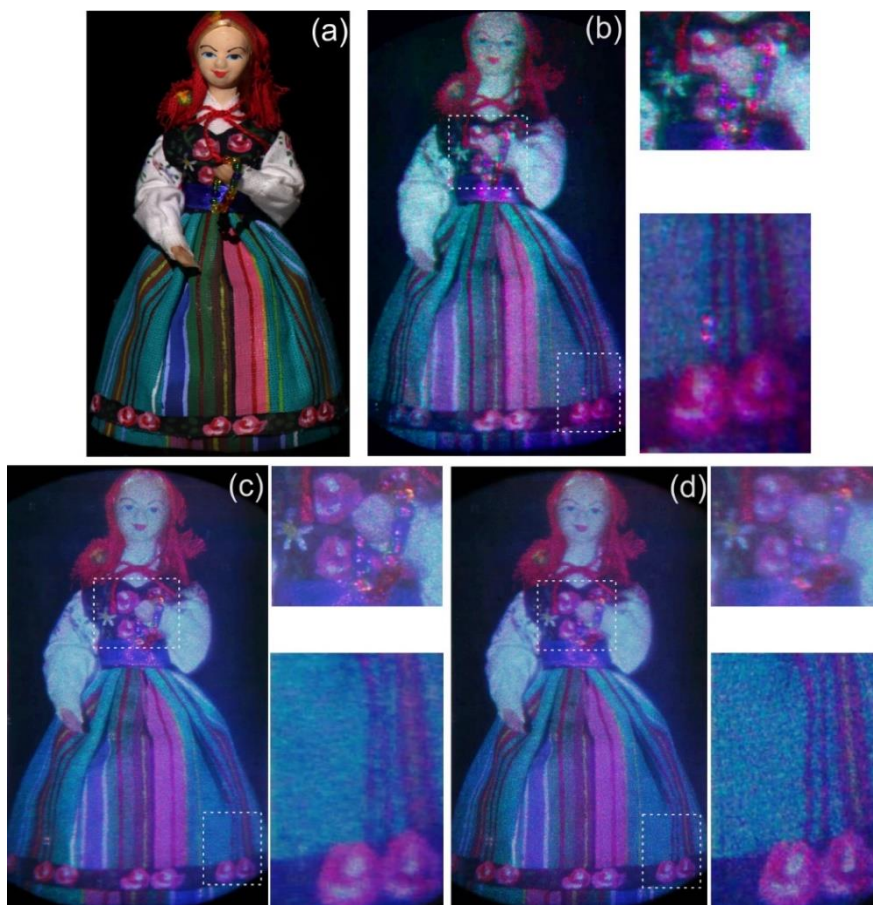
Przedstawiona zależność pokazuje zaletę zastosowanej metody. Uwzględnia ona fizyczną modyfikację parametrów propagującej się fali sferycznej. Rozdzielczość i wymiar pola wyjściowego skalowany jest zgodnie ze stosunkiem promieni krzywizny rozpatrywanych

wiązek. Opracowany algorytm pozwala na propagację pomiędzy płaszczyznami x_2 i ξ_2 z dużą dokładnością oraz wysoką wydajnością. Dzięki temu bezsoczewkowy cyfrowy hologram Fouriera może być zrekonstruowany w układzie wyświetlacza w dowolnej odległości bez spadku jakości obrazowania. W ostatnim kroku amplituda zespolona $O_c(\xi_2, F_p)$ kodowana jest w fazowym hologramie z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3.4.

Algorytm generacji hologramu opisany jest dla pojedynczej długości fali. Zaproponowany system wykorzystuje trzy źródła światła RGB. Dla każdej barwy wymiar piksela numerycznej rekonstrukcji w płaszczyźnie x_1 jest różny. Najmniejszy wymiar uzyskiwany jest dla barwy niebieskiej. Żeby był on taki sam dla wszystkich składowych, obiekt dla czerwonego i zielonego komponentu musi być w pierwszej kolejności zrekonstruowany z hologramu o zmienionym wymiarze $\lambda_p/\lambda_B(1080 \times 1920)$, a następnie docięty do wymiarów modulatora.

4.4. Optyczne rekonstrukcje rzeczywistego obiektu 3D

Rozdział ten przedstawia wyniki optycznych rekonstrukcji barwnego, rzeczywistego obiektu 3D w skali 1:1, które otrzymywane są w zaprezentowanym układzie wyświetlacza holograficznego z oknem obserwacji i oświetleniem niekoherentnym. Dodatkowo porównuje on jakość obrazowania uzyskaną dla dwóch metod odtworzenia barwy: multipleksingu częstotliwościowego oraz czasowego. Jako dane wejściowe wykorzystywany jest bezsoczewkowy, cyfrowy hologram Fouriera przedmiotu 3D w postaci figurki przedstawiającej lalkę. Rozpatrywany obiekt ma wymiary: 120 mm wysokości, 60 mm szerokości oraz 50 mm głębokości. Umieszczony jest on w odległości $R_1 = 1,06$ m od płaszczyzny hologramu początkowego. Lalka ubrana jest w łowicki stój ludowy, który uznawany jest za najbardziej rozpoznawalny ubiór regionalny w Polsce. Jest on bogaty w różnorodne detale oraz złożony z wielu barw. Parametry układu rejestracji są następujące: rozdzielczość kamery 2448×2050 , wymiar piksela $3,45 \mu\text{m}$, odległość przedmiotu od kamery $R_1 = 1,06$ m, długości fal laserów $\lambda_{R1} = 637$ nm, $\lambda_{G1} = 532$ nm, $\lambda_{B1} = 457$ nm, $aFoV_1 = 7,6^\circ$ dla niebieskiego komponentu [65]. Zaproponowany wyświetlacz holograficzny charakteryzuje większy kąt pola widzenia ($aFoV_2 = 8,8^\circ$) niż układ rejestracji. Dlatego możliwe jest w nim wyświetlenie i obserwacja całego przedmiotu. Wszystkie obrazy zaprezentowane w rozdziałach 4.4 – 4.6 rejestrowane są z wykorzystaniem aparatu fotograficznego ze zmienną ogniskową, umieszczonego w płaszczyźnie okna obserwacji VW.



Rys. 4-4. (a) Zdjęcie lalki łowickiej oraz jej optyczne rekonstrukcje z wykorzystaniem (b) multipleksingu częstotliwościowego oraz (c), (d) multipleksingu czasowego dla dwóch płaszczyzn zogniskowania aparatu: (c) bluzka, (d) spódnica.

Na Rys. 4-4 przedstawiony jest rozpatrywany obiekt 3D oraz jego optyczne rekonstrukcje. Rys. 4-4(a) zawiera zdjęcie łowiczanki. Na Rys. 4-4(b) zamieszczony jest barwny obraz uzyskany z użyciem metody multipleksingu częstotliwościowego, która omówiona jest szczegółowo w rozdziale 3. Płaszczyzna ostrości aparatu ustawiona jest na bluzkę lalki. Fragmenty zdjęcia, zaznaczone przerywanymi prostokątami, zostały powiększone i zaprezentowane na osobnych obrazach. Rys. 4-4(c) i (d) zawierają wyniki rekonstrukcji tego samego obiektu, ale uzyskanej z wykorzystaniem metody multipleksingu czasowego. Różnica w jakości zapisanych obrazów jest widoczna. Jest to spowodowane trzykrotnym spadkiem rozdzielczości otrzymywanym w zastosowaniu pierwszej techniki. Lepsze rezultaty otrzymywane są z użyciem drugiej metody. Celem opracowanego systemu wyświetlacza holograficznego z oknem obserwacji jest uzyskanie jak najwyższej rozdzielczości rekonstrukcji. Dlatego wyniki zamieszczone na Rys. 4-5 i 4-8 uzyskane zostały z zastosowaniem techniki multipleksingu czasowego. Zdjęcia przedstawione na Rys. 4-4(c)

i 4-4(d) pokazują obrazy tego samego obiektu, ale wykonane dla dwóch płaszczyzn zogniskowania. Na Rys. 4-8(c) ostro odwzorowana jest ręka, bransoletka i kwiaty na bluzce, a na Rys. 4-8(d) spódnica lalki. Odległość pomiędzy wybranymi powierzchniami wynosi około 18 mm. Gdy jedna z nich jest ostro odwzorowana, druga jest rozmazana. Spódnica odtworzona jest bliżej okna obserwacji niż bluzka lalki. Oznacza to, że wyświetlacz potrafi prawidłowo zrekonstruować głębię przedmiotu. Jakość uzyskanych obrazów jest bardzo wysoka. Możliwe jest nawet rozróżnienie faktury materiału, z którego uszyta jest spódnica.

4.5. Deformacje zrekonstruowanego przedmiotu 3D

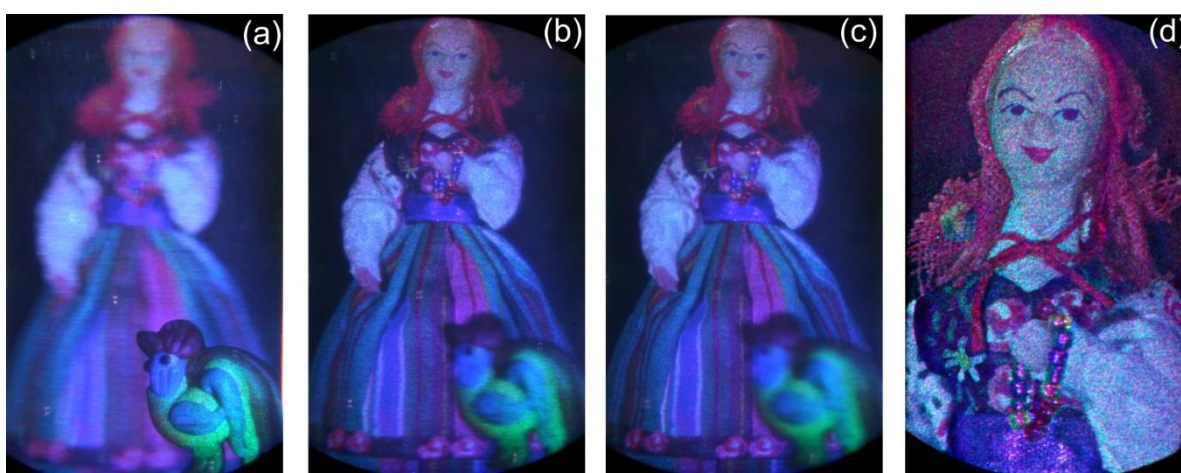
Celem opracowanego algorytmu konfokalnej propagacji Fresnela jest zrekonstruowanie centralnej części trójwymiarowego przedmiotu (płaszczyzna x_2) z niezmienną geometrią. To zadanie realizowane jest numerycznie, poprzez uwzględnienie cyfrowego powiększenia poprzecznego obiektu oraz różnic między parametrami układu rejestracji i rekonstrukcji, tj. promieniami krzywizny i długościami fal. Pole optyczne w płaszczyźnie x_2 tworzone jest przez naniesienie odpowiednich zmian na pole obiektowe, które zapisane jest dla długości fali λ_1 oraz dla promienia krzywizny R_1 . Hologram, wyświetlany za pomocą modulatora SLM, wygenerowany jest dla parametrów układu rekonstrukcji. Dlatego dla środkowej płaszczyzny przedmiotu ($z_2 = 0$) obraz powstaje bez deformacji. Dla $z_2 \neq 0$ są one zauważalne. Rozpatrzmy układ zaprezentowany na Rys. 4-1. Współrzędne $z_1 = 0$ oraz $z_2 = 0$ oznaczają kolejno środkową płaszczyznę przedmiotu i obrazu. Jak wspomniano na powstawanie deformacji przedmiotu wpływ mają różnice pomiędzy długościami fal układów rejestracji i rekonstrukcji, promieniami krzywizny wiązki przedmiotowej i obrazowej oraz wartość wprowadzanego powiększenia poprzecznego obrazu. Gdy w systemie wyświetlacza występują wszystkie źródła zaburzeń, zależność pomiędzy polem obrazowym w płaszczyźnie z_2 i polem przedmiotowym w z_1 przedstawiona jest równaniem:

$$O_2(x_2, z_2) = O_1(m^{-1}x_2, D_z^{-1}z_2) \exp \left[\frac{i\pi\kappa m D_z x_2^2}{\lambda_2 D_z} \right], \quad (4-7)$$

gdzie κ oznacza krzywiznę aberracji sferycznej, m jest powiększeniem poprzecznym układu rekonstrukcji, a D_z określa położenie wzdluzne płaszczyzny odległej od centrum zrekonstruowanego przedmiotu. Równanie (4-7) opisuje relację pomiędzy amplitudą zespoloną obiektu $O_1(x_1, z_1)$ i jego obrazu $O_2(x_2, z_2)$ i może być wykorzystane do wyznaczenia deformacji obrazu powstających w systemie wyświetlacza.

Przyjrzyjmy się dokładniej trzem przypadkom obrazowania: rekonstrukcji przedmiotu 3D o dużej głębi w skali 1:1, odtworzeniu obiektu w innym położeniu wzdluznym oraz jego

przemieszczeniu i powiększeniu poprzecznym. W artykule [63] zamieszczone są wyniki numerycznej analizy zmiany geometrii kształtu odtworzonego obiektu powstającą dla analizowanych różnic między układem rejestracji i rekonstrukcji. Na Rys. 4-5 zamieszczone są wyniki optycznych rekonstrukcji, sfotografowane za pomocą aparatu umieszczonego w oknie obserwacji, uzyskane dla rozpatrywanych wariantów. W pierwszym generowana jest scena 3D składająca się z dwóch obiektów rzeczywistych: figurki koguta umieszczonej na odległości $R_2 = 0,5$ m oraz łowiczanki (z poprzedniego eksperymentu) położonej w płaszczyźnie $R_2 = 1,06$ m. Oba przedmioty zajmują takie samo miejsce w zaprojektowanej scenie, jak w układzie rejestracji ($R_2 = R_1$). Zgodnie z analizą przeprowadzoną w artykule [64], dla obrazowania 1:1 największe deformacje obrazu powstają dla zielonego komponentu. Jest to spowodowane największą różnicą między λ_1 , a λ_2 dla kanału G. W rezultacie obiekt rekonstruowany jest z powiększeniem równym 1,007. Na Rys. 4-5(a) zamieszczone jest zdjęcie optycznej rekonstrukcji sceny wykonane dla płaszczyzny ostrości znajdującej się na kogucie, natomiast na Rys. 4-5(b) na lalce. Jakość obrazowania dla obu obiektów jest bardzo wysoka.



Rys. 4-5. Optyczna rekonstrukcja scen 3D utworzonych z dwóch przedmiotów: koguta i lalki, zarejestrowanych dla różnych płaszczyzn ogniskowania aparatu. (a) Łowiczanka 1,06 m, (b) kogut 0,5 m, (c) lalka 2 m (kogut 0,5 m) oraz (d) lalka 2 m powiększona cyfrowo $m_D = 2$ (kogut 0,5 m).

W celu zademonstrowania możliwości rekonstrukcji przedmiotu w dowolnym położeniu wzdłużnym, tworzona jest nowa scena 3D, w której łowiczanka przesunięta jest na odległość $R_2 = 2R_1$, a kogut zajmuje to samo miejsce co poprzednio. Zarejestrowane zdjęcie umieszczone jest na Rys. 4-5(c). Aparat zogniskowany jest na bluzkę lalki. Deformacje powstałe w obrazie lalki, których źródłem, w głównej mierze, jest różnica w promieniach krzywizny wiązki rejestrującej i rekonstruującej, są niezauważalne. Jednocześnie zaobserwować można większe rozmycie figurki koguta, spowodowane zwiększoną odległością między rozpatrywanymi

przedmiotami. W trzecim przypadku hologram z Rys. 4-5(c) jest cyfrowo, dwukrotnie powiększony ($m_D = 2$). Jak pokazano w pracy [63] dla $m_D = 2$ deformacje obiektu są znaczące. Jednak jak pokazują wyniki przedstawione na Rys. 4-5(d) nie wpływają one na jakość rekonstrukcji. Wiele drobnych szczegółów przedmiotu jest ostro odwzorowanych.

4.6. Analiza wpływu koherencji przestrzennej źródła światła na rozdzielczość i głębię rekonstrukcji

Zgodnie z równaniem (3-15) wpływ koherencji przestrzennej na rozdzielczość obrazowania może być przedstawiony jako operacja liniowej filtracji częstotliwości przestrzennych przedmiotu przez funkcję filtracji, która charakteryzowana jest przez stopień koherencji przestrzennej źródła światła \tilde{g} . Zgodnie z analizą przeprowadzoną w artykule [63] rozkład intensywności w płaszczyźnie rekonstrukcji x_2 , w systemie z oknem obserwacji, opisany jest równaniem:

$$I(x_2) = \tilde{g}\left(\frac{mx_2}{\lambda z_2}\right) \otimes I_{coh}(x_2), \quad (4-8)$$

gdzie I_{coh} jest intensywnością obrazu uzyskiwaną dla koherentnego źródła światła. Ze wzoru wynika, że stopień koherencji oświetlenia skalowany proporcjonalnie do powiększenia systemu m oraz odwrotnie proporcjonalnie do odległości rekonstrukcji z_2 .

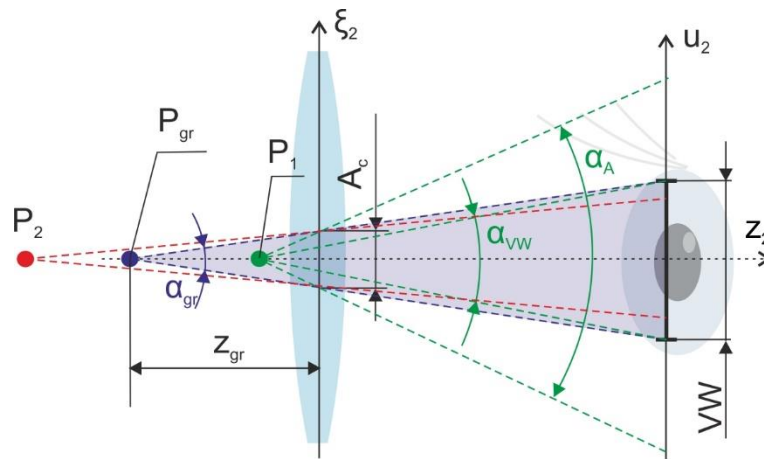
Rys. 4-6 przedstawia geometryczną interpretację efektu jaki wywiera częściowa koherencja przestrzenna źródła światła. Ograniczona koherencja reprezentowana jest przez przestrzeń A_c w płaszczyźnie ξ_2 , która jest przeskalowanym obszarem koherencji A_{c0} oświetlającym modulator SLM ($A_c = mA_{c0}$). W celu zdefiniowania spadku jakości rekonstrukcji rozpatrywane jest obrazowanie pojedynczego punktu P umieszczonego w odległości z_2 od płaszczyzny hologramu. Dla rozpatrywanego punktu wyznaczone są dwa kąty: α_A definiujący kątowy wymiar obszaru A_c oraz α_{vW} wyznaczający kątowy wymiar okna obserwacji B_{vW} . Stosunek α_A/λ wyraża maksymalną wartość SBP fali sferycznej emitowanej z punktu P, dla warunków narzuconych przez obszar koherencji A_c . Natomiast α_{vW}/λ jest miarą szerokości dla obrazowania koherentnego. W związku z tym wartość kąta α_A może być rozpatrywana jako czynnik ograniczający rozdzielczość rekonstrukcji, a wartość kąta α_{vW} jako maksymalna rozdzielczość uzyskiwana w systemie dla lasera i zastosowanego modulatora SLM. Rys. 4-6 ilustruje trzy przypadki obrazowania dla punktów P_1 , P_2 i P_{gr} położonych w różnych odległościach od płaszczyzny hologramu na osi optycznej. Punkt P_{gr} jest punktem granicznym otrzymywanym dla warunków koherentnego oświetlenia ($\alpha_A = \alpha_{vW}$). Wszystkie punkty znajdujące się w większej od niego odległości charakteryzuje zmniejszona rozdzielczość. W związku

z tym punkt P_1 ($\alpha_A > \alpha_{VW}$) zrekonstruowany jest z maksymalną, a punkt P_2 z obniżoną rozdzielczością. Współrzędna wzdłużna, określająca położenie punktu P_{gr} , wyznaczana jest z równania:

$$z_{gr}^{\pm} = \frac{F_p C}{1 \pm C}, \quad (4-9)$$

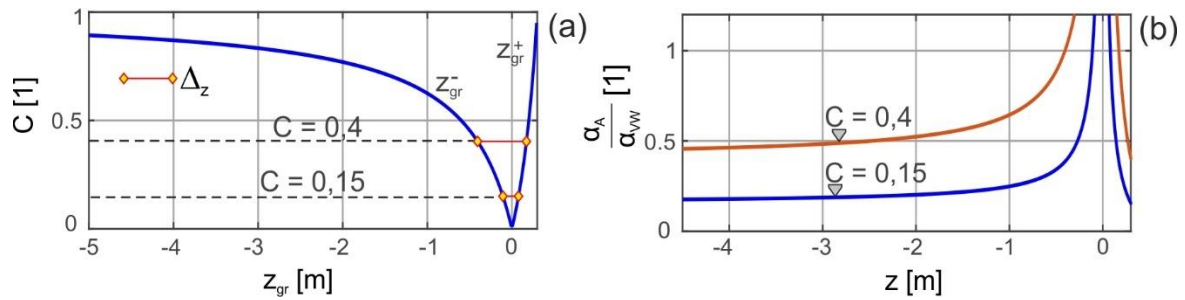
gdzie $C = A_c/B_{VW}$ jest parametrem koherencji, a „+” i „-” odpowiadają współrzędnym punktów granicznych otrzymywanym dla rzeczywistego i pozornego obrazu.

W opracowanym systemie zrekonstruowane punkty obserwowane są gołym okiem. Wymiar okna obserwacji w wyświetlaczu wynosi $B_{VW} = 6,44$ mm. Natomiast średnica źrenicy oka w świetle dziennym wynosi około $B_{oko} = 4$ mm. Gdy $B_{VW} > B_{oko}$ nie wszystkie szczegóły obrazu są widoczne przez użytkownika. Optymalizacja warunków obserwacji może być osiągnięta, gdy $B_{VW} = B_{oko}$. W zaproponowanym systemie równość ta może być spełniona przez zwiększenie wartości powiększenia m układu afokalnego 4F o 1,61.



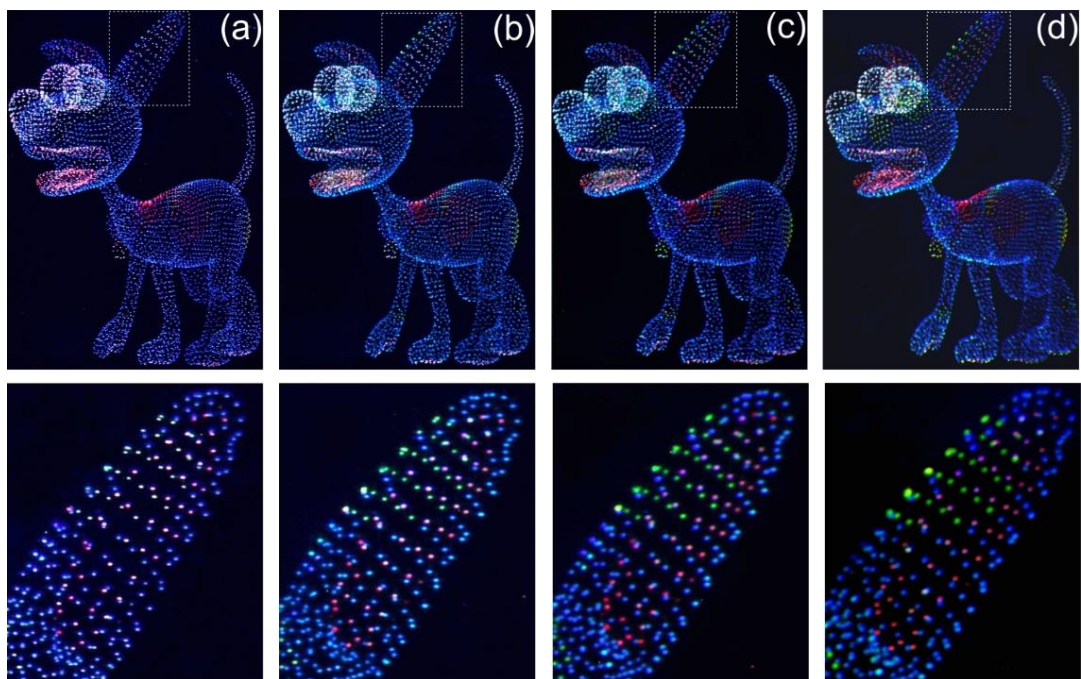
Rys. 4-6. Geometryczna ilustracja efektu obrazowania dla niekoherentnego źródła światła o obszarze koherencji A_c .

Wpływ koherencji przestrzennej źródła światła na rozdzielczość i głębię obrazowania zademonstrowany jest na Rys. 4-7(a) i (b). Rys. 4-7(a) pokazuje głębję rekonstrukcji $\Delta_z = z_{gr}^+ - z_{gr}^-$ w funkcji parametru koherencji C , dla której obserwator widzi wszystkie szczegóły obrazu. Na wykresie zaznaczone są dwa przypadki: $C = 0,15$ mm (zrealizowany system) i $C = 0,4$ (zoptymalizowany system). Symulacje wykonane są dla $\lambda_2 = 515$ nm i ogniskowej soczewki połowej $F_p = 600$ mm. Dla pierwszego wariantu otrzymywana jest głębja rekonstrukcji $\Delta_z = 184$ mm. Dla zoptymalizowanego wymiaru okna obserwacji jest ona znacząco zwiększona i wynosi $\Delta_z = 571$ mm. Na Rys. 4-7(b) zamieszczone są krzywe pokazujące spadek rozdzielczości obrazowania, definiowany jako stosunek kątów α_A/α_{VW} , wraz ze wzrostem odległości rekonstrukcji dla obu rozpatrywanych przypadków.



Rys. 4-7. (a) Głębina rekonstrukcji, dla której uzyskiwana jest maksymalna rozdzielczość obrazowania z wykorzystaniem niekoherentnego źródła światła oraz (b) spadek rozdzielczości w funkcji odległości dla $C = 0,15$ mm i $C = 0,4$ mm (niebieska krzywa wyznaczana jest dla parametrów zrealizowanego systemu).

W celu weryfikacji uzyskanych wyników analizy numerycznej realizowany jest eksperyment, który bada jakość i głębokość rekonstrukcji w zaprezentowanym systemie. Jako dane wejściowe wykorzystywany jest komputerowo generowany hologram. Tworzony jest on z modelu 3D składającego się z chmury punktów, który przedstawia wielobarwnego psa. Obiekt złożony jest z 7000 punktów i na odległości $R_2 = 600$ mm ma wymiary: 70 mm wysokości, 50 mm szerokości oraz 50 mm głębokości. Punktowa budowa przedmiotu doskonale nadaje się do oceny jakości obrazowania, ponieważ rozmycie punktu jest miarą spadku rozdzielczości. Hologram wyświetlany na modulatorze SLM wygenerowany jest z użyciem metody opisanej w artykule [61]. Na Rys. 4-8 pokazane są wyniki rekonstrukcji hologramów zaprojektowanych i sfotografowanych dla różnych odległości R_2 : 600 mm, 1 m, 2 m i 10 m. W płaszczyznach $R_2 \neq 600$ mm wymiary obiektu są skalowane tak, aby jego wymiar kątowy był stały. Na wszystkich zdjęciach aparat zogniskowany jest na lewe ucho psa. Ten fragment przedmiotu, oznaczony przerywanym prostokątem, jest powiększony i zaprezentowany na osobnym obrazie. Wyniki pokazują, że wymiar pojedynczego punktu rośnie wraz z odległością rekonstrukcji. Największą zmianę zaobserwować można między odległością 600 mm, a 1 m. Jednak rozmycie punktów dla wszystkich R_2 jest niewielkie. Model zrekonstruowany na $R_2 = 10$ m obrazowany jest z bardzo wysoką jakością. Uzyskane wyniki eksperymentalne potwierdzają, że przedstawiony system wyświetlacza umożliwia uzyskanie bardzo dużej głębokości rekonstrukcji.



Rys. 4-8. Optyczna rekonstrukcja komputerowego modelu 3D złożonego z chmury punktów, który przedstawia psa, zarejestrowana dla różnej odległości rekonstrukcji R_2 (a) 600 mm, (b) 1 m, (c) 2 m oraz (d) 10 m. Aparat zogniskowany jest na lewe ucho, które zostało pokazane na powiększonych zdjęciach.

4.6. Podsumowanie

Przedstawiony w tym rozdziale system wyświetlacza holograficznego zapewnia rekonstrukcję dużych, rzeczywistych przedmiotów 3D, które mogą być obserwowane gołym okiem. W tym celu stosowana jest nowa ścieżka obrazowania bazująca na konwencji Fouriera. Wykorzystuje ona dane pozyskane w bezsoczewkowym układzie rejestracji Fouriera, opracowany algorytm propagacji konfokalnej oraz zmodyfikowany układ wyświetlacza z oknem obserwacji i oświetleniem niekoherentnym. Metoda umożliwia odtworzenie obrazu obiektu o zmienionej geometrii. Może być on cyfrowo powiększony, jak również może zajmować dowolne położenie wzdłużne i poprzeczne. Szczególnym przypadkiem obrazowania, realizowanym przez wyświetlacz, jest odtworzenie przedmiotu w skali 1:1. Gdy obiekt rekonstruowany jest dla innych parametrów niż został on zarejestrowany, w obrazie powstają deformacje. Jednak jak pokazują wyniki eksperymentalne nawet wtedy uzyskiwane są rezultaty o bardzo wysokiej jakości.

Zbudowany układ wyświetlacza z oknem obserwacji i oświetleniem niekoherentnym pozwala na rekonstrukcję atrakcyjnych, barwnych obrazów 3D. Uzyskane wyniki eksperymentalne udowadniają, że pomimo stosowania źródła światła o niskim stopniu

koherencji przestrzennej i czasowej możliwe jest uzyskanie wysokiej jakości rekonstrukcji, która zachowana jest na bardzo dużej głębi. Dla obiektu złożonego z chmury punktów wynosi ona 10 m.

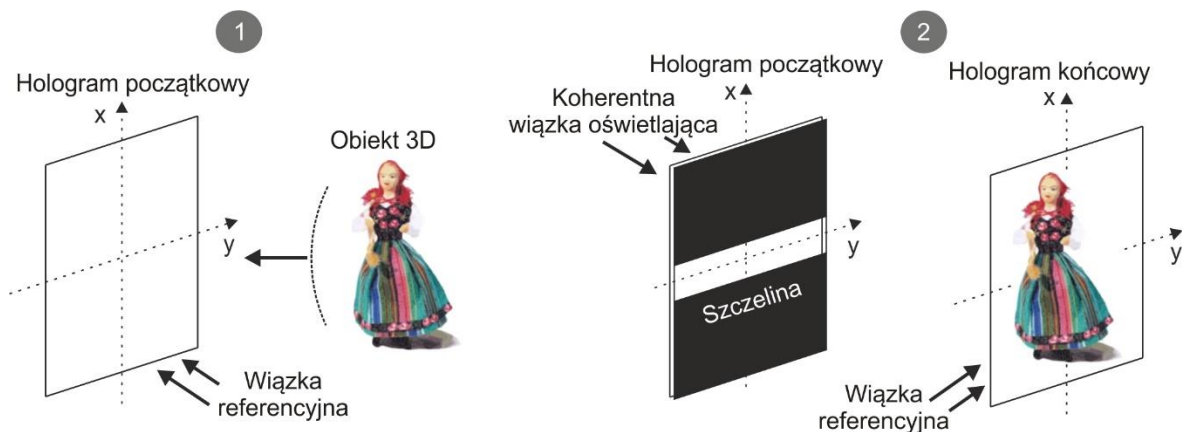
W opracowanym systemie barwa przedmiotu może być odtworzona z wykorzystaniem metody multipleksingu częstotliwościowego lub czasowego. Pierwsza technika pozwala na uzyskanie obrazu z pojedynczego, zespolonego hologramu światła białego o trzykrotnie zmniejszonej rozdzielczości w kierunku pionowym. Druga zapewnia wyższą jakość rekonstrukcji kosztem częstotliwości odświeżania obrazu.

5. Tęczowy wyświetlacz holograficzny z rozszerzonym kątem pola widzenia

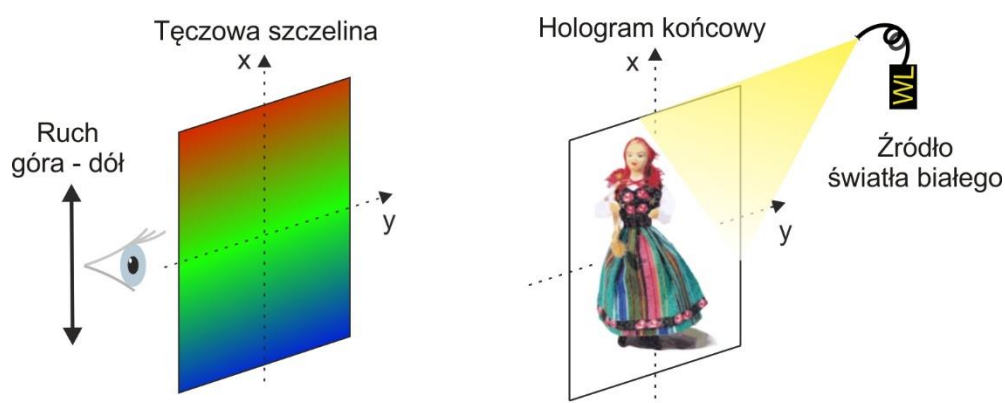
System wyświetlacza holograficznego z oknem obserwacji opisany w poprzednim rozdziale pozwala na obserwację dużych obiektów 3D gołym okiem. Cały zrekonstruowany przedmiot widoczny jest, gdy źrenica oka umieszczona jest w małym oknie obserwacji. Dlatego system charakteryzuje ograniczony kąt pola widzenia. W rozdziale 2.2 przedstawione są metody, które pozwalają na rozwiązanie tego problemu przez zwiększenie SBP wyświetlacza. Innym, istotnym kierunkiem badań jest zmniejszenie ilości informacji wymaganych do uzyskania atrakcyjnej rekonstrukcji w szerokim kącie pola widzenia. Skuteczną metodą umożliwiającą realizację tego zadania jest usunięcie pionowej i odtworzenie jedynie poziomej paralaksy HPO (ang. *horizontal parallax only*) przedmiotu. Wiele metod wykorzystuje w tym celu matówkę asymetryczną ustawioną w płaszczyźnie rekonstrukcji [37 - 39, 68 - 71]. Cechą charakterystyczną tego elementu jest możliwość uzyskania kierunkowego rozproszenia światła. Takie rozwiązanie pozwala na rozszerzenie kąta pola widzenia w wybranej osi. Wadą rozwiązania jest znaczący spadek głębi rekonstrukcji przedmiotu 3D.

Inną dobrze znaną metodą HPO jest holografia tęczowa [72]. Technika polega na rejestracji obiektu z jedynie poziomą paralaksą, a następnie jego optycznej rekonstrukcji z wykorzystaniem pozaosiowego źródła światła białego. W rozwiązaniu tym proces zapisywania hologramu, przedstawiony schematycznie na Rys. 5-1, realizowany jest w dwóch krokach. W pierwszym rejestrowany jest hologram początkowy obiektu, na który nakładana jest szczelina. Usuwa ona pionową paralaksę przedmiotu przez usunięcie wysokich częstotliwości przedmiotu w kierunku pionowym. W drugim kroku tworzony jest hologram końcowy zrekonstruowanego przedmiotu z jedynie poziomą paralaksą. Zapisywany jest on na płycie światłoczułej, która ma bardzo wysoką rozdzielczość. Jest ona wymagana do zapisania pozaosiowego źródła światła.

W procesie rekonstrukcji, zilustrowanym na Rys. 5-2, hologram tęczowy oświetlony jest przez pozaosiowe źródło światła białego. Na jego powierzchni dochodzi do dyspersji światła, co powoduje powstawanie tzw. efektu tęczy. Na wyjściu układu rekonstruowany jest ostry i jasny obraz przedmiotu, który może być obserwowany w zwiększonym kącie pola widzenia w zmieniających się barwach tęczy.



Rys. 5-1. Schemat dwustopniowego procesu rejestracji hologramu tęczowego.



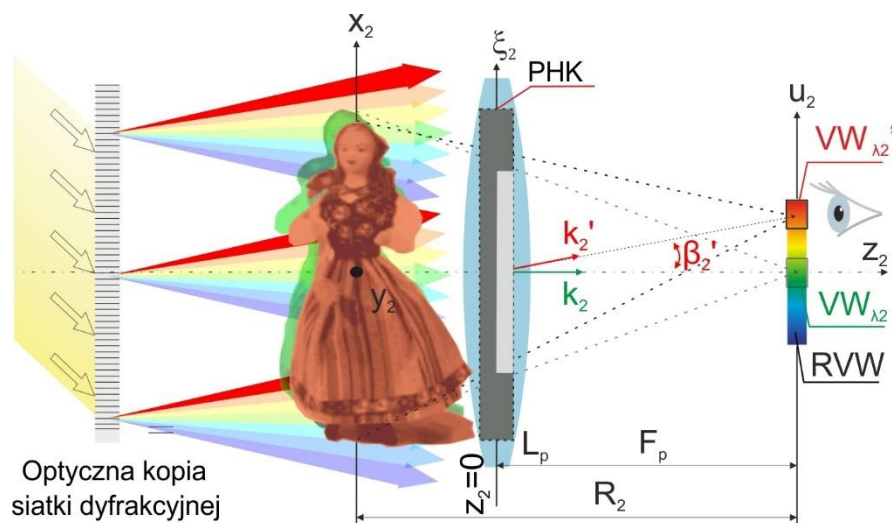
Rys. 5-2. Schemat rekonstrukcji hologramu tęczowego z wykorzystaniem pozaosiowego źródła światła białego.

W holografii cyfrowej przedstawiony koncept wykorzystywany jest głównie do komputerowej generacji hologramów, które drukowane są na materiale światłoczułym, a następnie optycznie rekonstruowane [73 - 75]. W pracy [76] numerycznie utworzony hologram tęczowy jest bezpośrednio rekonstruowany przez modulator oświetlony światłem białym. Jednak wymiar piksela współczesnych urządzeń SLM powoduje, że dyspersja na ich powierzchni jest zbyt mała by uzyskać wymagany efekt tęczy.

W tym rozdziale przedstawiony jest system tęczowego wyświetlacza holograficznego, w którym stosowane jest zewnętrzne oświetlenie tęczowe. Generowane jest ono przez wysokoczęstotliwościową siatkę dyfrakcyjną oświetloną diodą światła białego. Takie rozwiązanie zapewnia wysoką rozdzielczość obrazu i rozszerzony kąt pola widzenia wyświetlacza z oknem obserwacji (rozdział 4). Zaproponowana metoda została opublikowana w artykule [77]. Rozwiązanie umożliwia podniesienie komfortu obserwacji dużych obiektów 3D. Pomimo, że system nie rekonstruuje rzeczywistej barwy przedmiotu zapewnia on atrakcyjne obrazy, których barwa zmienia się wraz z położeniem oka obserwatora.

5.1. Koncepcja tęczowego wyświetlacza holograficznego

Na Rys. 5-1 przedstawiona jest geometria powstawania i obserwacji obrazu 3D w zaproponowanym systemie tęczowego wyświetlacza holograficznego z jedynie poziomą paralaksą i źródłem światła białego. Pozwala on na rekonstrukcję dużych, rzeczywistych przedmiotów 3D i ich obserwację w zwiększonym kącie pola widzenia. Jako dane wejściowe wykorzystuje on hologramy cyfrowe rzeczywistych przedmiotów lub komputerowo generowane hologramy wirtualnych modeli 3D, które tworzone są w płaszczyźnie hologramu początkowego (Rys. 4-1). Hologramy zawierają transformatę Fouriera wiązki obiektowej z płaszczyzny przedmiotowej (x_1, y_1). Zarejestrowane dane przetwarzane są numerycznie w dwóch krokach. W pierwszym na hologram nakładana jest szczelina w kierunku pionowym. W drugim hologram z płaszczyzny hologramu początkowego jest numerycznie transformowany do płaszczyzny hologramu końcowego PHK układu wyświetlacza, która jest optyczną powiększoną ($m = -6$) kopią modulatora SLM. Szczegółowy opis metody generacji cyfrowego hologramu tęczowego znajduje się w rozdziale 5.3.



Rys. 5-1. Geometria powstawania i obserwacji obrazu w systemie tęczowego wyświetlacza holograficznego.

W układzie wyświetlacza hologram tęczowy przedmiotu z usuniętym członem sferycznym oraz pionową paralaksą rekonstruowany jest z płaszczyzny hologramu końcowego. Na modulator pada tęczowa wiązka światła powstała w wyniku dyspersji światła białego na transmisyjnej siatce dyfrakcyjnej o okresie d . Siatka oświetlona jest w kierunku pionowym pod kątem $\theta = \sin^{-1}(\lambda_2/d)$, odpowiadającym jej pierwszemu rzędowi dyfrakcyjnemu. W rezultacie modulator znajdujący się za siatką oświetlony jest normalnie do swojej powierzchni dla wiązki

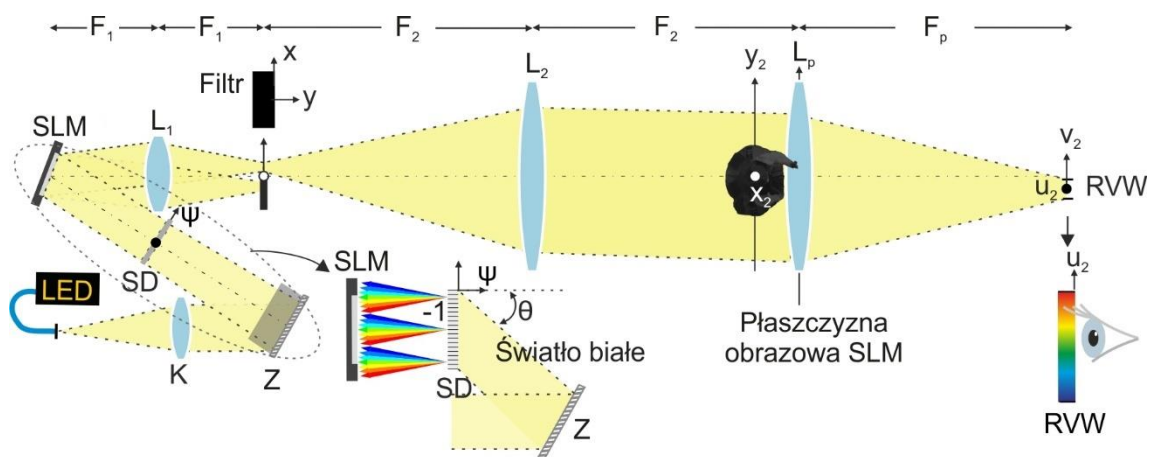
o centralnej długości fali światła białego $\lambda_2 = 540$ nm. Dla innych długości fal zawartych w źródle kąty oświetlenia są inne i różne od zera. W płaszczyźnie hologramu końcowego umieszczona jest soczewka polowa L_p , która dodaje krzywiznę wiązki obiektowej odjętą w procesie rejestracji i przetwarzania hologramu (rozdział 4). Hologram tęczowy, generowany dla długości fali $\lambda_2 = 540$ nm, rekonstruowany jest przez zbiór wiązek płaskich o różnych kątach nachylenia. Dla każdej z nich, w płaszczyźnie ogniskowej soczewki L_p , powstaje okno obserwacji w innym położeniu pionowym. Suma intensywności w płaszczyźnie u_2 dla wszystkich długości fal nazywana jest tęczowym oknem obserwacji RVW (ang. *rainbow viewing window*). Jego powstawanie zwiększa pole obserwacji wyświetlacza w kierunku pionowym i wzdłużnym. Efekt ten jest szczegółowo opisany w rozdziale 5.4. Umieszczenie źrenicy oka wewnątrz utworzonego obszaru pozwala zobaczyć cały zrekonstruowany obiekt 3D. Dla różnych punktów otrzymywane są widoki w różnych barwach. Właściwości spektralne obserwowanych obrazów omówione są w rozdziale 5.5.

5.2. Budowa tęczowego wyświetlacza holograficznego

Schemat układu zbudowanego tęczowego wyświetlacza holograficznego przedstawiony jest na Rys. 5-2. Składa się on z modułu oświetlającego oraz obrazującego. Pierwszy moduł generuje zewnętrzne oświetlenie tęczowe modulatora SLM. Jest ono uzyskiwane z zastosowaniem źródła światła białego oraz wysokoczęstotliwościowej siatki dyfrakcyjnej. Dioda z wyjściem światłowodowym (DoricLenses W55, wymiar rdzenia światłowodu $960 \mu\text{m}$) znajduje się w płaszczyźnie ogniskowej soczewki kolimującej K. Za soczewką tworzony jest płaski front falowy. Następnie wiązka oświetla siatkę dyfrakcyjną SD (860 linii/mm) pod kątem $\theta = 28^\circ$ w kierunku pionowym. Dla wybranej wartości kąta uzyskiwany jest normalny kierunek propagacji -1-szego rzędu dyfrakcyjnego siatki dla centralnej długości fali wykorzystanego źródła światła ($\lambda_2 = 540$ nm). Prawidłowy kierunek propagacji wiązki padającej na siatkę uzyskiwany jest z użyciem zwierciadła Z. Za siatką dyfrakcyjną powstaje tęczowa wiązka oświetlająca, która pada na fazowy modulator SLM ustawiony w orientacji pionowej (Holoeye 1080P, wymiar piksela $\Delta = 8 \mu\text{m}$, rozdzielczość 1920×1080). Położony jest on na tej samej wysokości co siatka dyfrakcyjna.

Moduł obrazujący umożliwia generację i obserwację dużych obiektów rzeczywistych gołym okiem. W tym celu zawiera on układ powiększający 4F oraz soczewkę polową L_p , tworzącą tęczowe okno obserwacji w swoim ognisku. System 4F o powiększeniu $m = -6$ zbudowany jest z soczewek L_1 ($F_1 = 100$ mm) oraz L_2 ($F_2 = 600$ mm). W płaszczyźnie ogniskowej soczewki L_1 znajduje się pionowy filtr absorpcyjny, który przepuszcza tylko +1 rząd dyfrakcyjny

modulatora SLM. Wykorzystanie filtra umożliwia dekodowanie informacji zespolonej zakodowanej w fazowym hologramie na etapie jego przetwarzania. Schemat rejestracji i rekonstrukcji zespolonego frontu falowego jest szczegółowo opisany w rozdziale 3.4. W płaszczyźnie obrazowej modulatora SLM zlokalizowana jest soczewka polowa L_p ($F_p = 600$ mm), która uzupełnia krzywiznę wiązki obiektowej wyświetlanej na urządzeniu. W ognisku soczewki L_p tworzone jest tęcze okno obserwacji RVW. W zaprezentowanym rozwiązaniu siatka dyfrakcyjna oświetlona jest od dołu, dlatego wiązka o niebieskiej barwie pada na modulator SLM od dołu, a o czerwonej od góry. Ze względu na ujemne powiększenie systemu w płaszczyźnie RVW barwy są odwrócone. Przedstawiony układ charakteryzuje zwiększone pole obserwacji w kierunku pionowym i wzdłużnym. Jego wymiar analizowany jest numerycznie i eksperymentalnie w rozdziale 5.4. Rozdzielczość rekonstruowanych obiektów ograniczona jest przez kątową zdolność rozdzielczą oka ($1/60^\circ$). Głębina rekonstrukcji zależy od wysokości szczeliny nakładanej na hologram cyfrowy w procesie generacji. Efekt ten omówiony jest w rozdziale 5.5.



Rys. 5-2. Schemat budowy systemu tęcowego wyświetlacza holograficznego.

Porównując schemat układu rekonstrukcji z oknem obserwacji (Rys. 4-3) oraz wyświetlacza tęcowego można zauważyć, że mają one tak samo zbudowany moduł obrazujący. Różnią się tylko modułem oświetlającym. Dzięki temu w prosty sposób można przekształcić jeden system w drugi.

5.3. Metoda generacji cyfrowych hologramów tęcowych

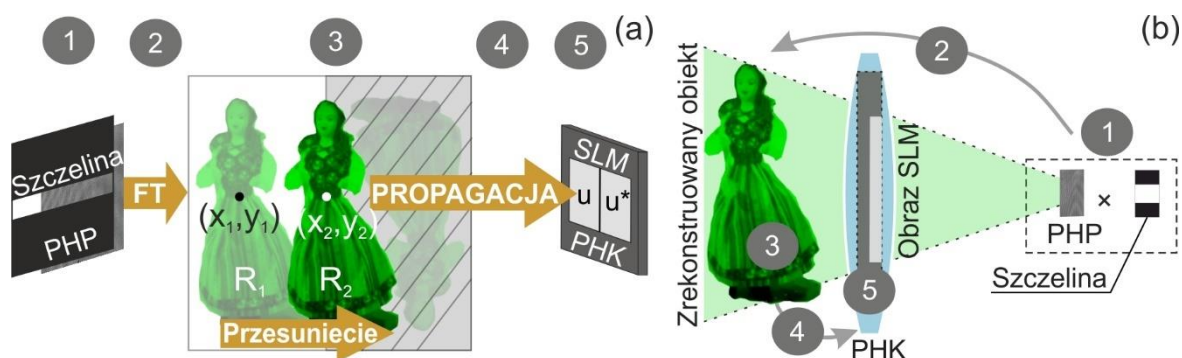
W przedstawionym systemie hologram tęcowy, wyświetlany na modulatorze SLM, generowany jest z hologramu cyfrowego zarejestrowanego w układzie, którego geometria opisana jest w rozdziale 4.2. Algorytm ścieżki przetwarzania zaprezentowany jest poglądowo

na Rys. 5-3. Rys. 5-3(a) ilustruje schemat blokowy metody, natomiast Rys. 5-3(b) geometrię przetwarzania obrazu z układu rejestracji do układu rekonstrukcji. Generacja hologramu tęczowego odbywa się w pięciu krokach. W pierwszym kroku na cyfrowy hologram H , znajdujący się w płaszczyźnie hologramu początkowego wyświetlacza, nakładana jest szczelina w kierunku pionowym. Ogranicza ona jego wysokość zgodnie z równaniem:

$$H_t(u_2, v_2) = H(u_1, v_1)\Pi(u_1, S^{-1}), \quad (5-1)$$

gdzie indeks t oznacza hologram tęczowy, a S oznacza wymiar szczeliny. W ten sposób hologram z pełną paralaksą zamieniany jest w hologram z jedynie poziomą paralaksą. Wysokość szczeliny S powinna zawierać się w przedziale między 1 mm, a 7 mm. Wpływa on na rozdzielczość oraz głębię rekonstruowanego przedmiotu. Mały wymiar szczeliny pozwala na uzyskanie dużej głębi. Odbywa się to kosztem niższej rozdzielczości obrazu w płaszczyźnie modulatora SLM. Z tego powodu dla obiektów położonych blisko płaszczyzny hologramu końcowego najlepiej zastosować duży wymiar szczeliny, a dla przedmiotów położonych daleko odwrotnie. W zaproponowanym rozwiązaniu szczelina nakładana jest numerycznie na hologram zarejestrowany w płaszczyźnie hologramu początkowego. Oznacza to, że wartości pikseli znajdujących się poza nią zmieniane są na „0”. Np. gdy wymiar szczeliny równy jest 2 mm 70 % pikseli jest zerowana. Efekt wymiaru szczeliny na rozdzielczość i głębię rekonstruowanych obiektów przeanalizowany został w rozdziale 5.5.

W drugim kroku obiekt z jedynie poziomą paralaksą rekonstruowany jest z płaszczyzny hologramu początkowego z wykorzystaniem transformaty Fouriera. W efekcie powstaje obraz rzeczywisty i sprzężony zarejestrowanego przedmiotu oraz rząd zerowy. W trzecim kroku dwa ostatnie człony są filtrowane, a obraz rzeczywisty umieszczany jest w środku układu współrzędnych płaszczyzny (x_2, y_2) . W czwartym kroku obiekt propagowany jest do płaszczyzny hologramu końcowego, z wykorzystaniem metody propagacji konfokalnej Fouriera [63] na odległość $R_2 - F_p$, dla centralnej długości fali diody światła białego $\lambda_2 = 540$ nm. Technika jest omówiona w rozdziale 4.3. W ostatnim kroku zespolone pole przedmiotowe kodowane jest w fazowym hologramie z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3.4. Przedstawiony algorytm generacji hologramu tęczowego jest bardzo podobny do schematu tworzenia hologramu w systemie z oknem obserwacji (rozdział 4.3). Jedyna różnica polega na tym, że w technice przedstawionej na Rys. 5-3 na hologram w płaszczyźnie hologramu początkowego nakładana jest szczelina.



Rys. 5-3. Metoda generacji hologramu tęczowego dużych obiektów rzeczywistych: (a) schemat blokowy, (b) ilustracja przetwarzania obrazu z układu rejestracji do układu rekonstrukcji.

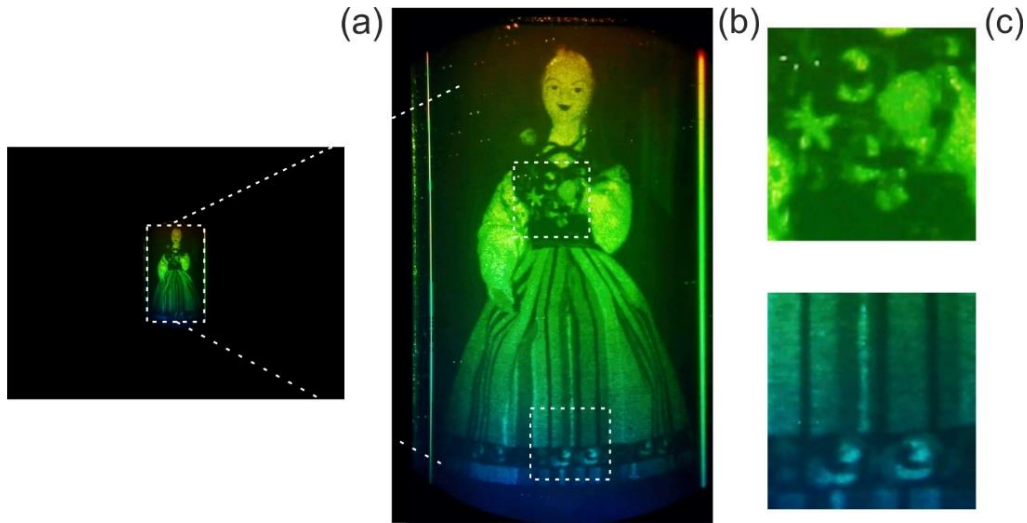
5.4. Optyczne rekonstrukcje rzeczywistego obiektu 3D

W rozdziale tym zaprezentowane są wyniki optycznych rekonstrukcji rzeczywistego obiektu 3D uzyskane w układzie rekonstrukcji pokazanym na Rys. 5-2. Jako dane wejściowe wykorzystywany jest hologram tęczy rzeczywistego obiektu 3D. Jest on tworzony z hologramu cyfrowego lalki łowickiej. Generowany jest dla centralnej długości fali białej diody LED ($\lambda_2 = 540 \text{ nm}$). Cechy przedmiotu oraz parametry kamery użytej do akwizycji zamieszczone są w rozdziale 4.4. W celu uzyskania najwyższej jakości obrazowania objętość przedmiotu zlokalizowana jest wokół płaszczyzny modulatora SLM ($R_2 = 600 \text{ mm}$). Z tego powodu na hologram nie jest nakładana szczelina. Podobnie jak w przypadku systemu opisanego w rozdziale 4, gdy $\lambda_1 \neq \lambda_2$ lub $R_1 \neq R_2$ tworzony jest obraz przedmiotu o zmienionej geometrii. Jednak jak pokazano na Rys. 4-5 nie wpływa to na jakość rekonstrukcji.

Wszystkie obrazy zaprezentowane w rozdziale 5 rejestrowane są za pomocą wysokiej jakości aparatu fotograficznego. Jego ustawienia dobrane są w takim sposób, żeby zapisane wyniki były najbliższe widokom obserwowanym przez człowieka [78]. Wartość ogniskowej soczewki aparatu wynosi $F = 43 \text{ mm}$, a liczba otworu $F_{num} = 7,1$. Dla takich parametrów rejestrowany obraz zajmuje tylko niewielką część sensora kamery, co zademonstrowane jest na Rys. 5-4. Z tego powodu rozdzielczość rekonstrukcji widziana gołym okiem jest zawsze wyższa. Problem ten dotyczy wszystkich wyników pokazanych w rozdziale 5.

Wynik optycznej rekonstrukcji tęczowego hologramu lalki łowickiej zamieszczony jest na Rys. 5-4. Obraz rejestrowany jest za pomocą aparatu fotograficznego umieszczonego 100 mm od płaszczyzny tęczowego okna obserwacji. W celu dokładniejszego pokazania szczegółowości uzyskanego obrazowania dwa fragmenty zdjęcia, oznaczone przerywanymi prostokątami, zostały powiększone. Można zauważyć, że jakość rekonstrukcji jest bardzo wysoka. Krawędzie przedmiotów są ostro odwzorowane, a szum plamkowy prawie

niewidoczny. Gdy kamera znajduje się poza płaszczyznę okna obserwacji obraz holograficzny jest wielobarwny.



Rys. 5-4. Optyczna rekonstrukcja tęczowego hologramu lalki łowickiej. (a) Zarejestrowany obraz na aparacie fotograficznym, (b) powiększony obraz obiektu, (c) ilustracja detali.

5.5. Analiza zwiększonego pola obserwacji

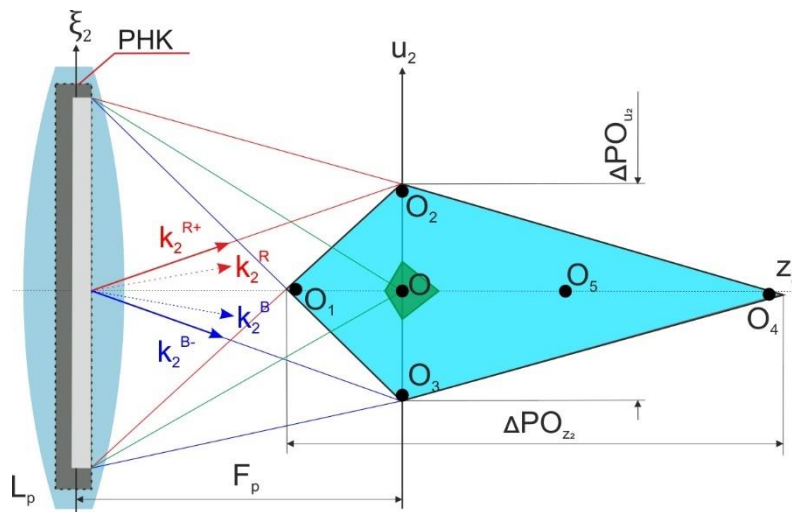
W płaszczyźnie wyjściowej układu wyświetlacza opisanego w rozdziale 5.2 tworzone jest tęczowe okno obserwacji. Jest ono sumą intensywności wszystkich wiązek zawartych w źródle światła białego w płaszczyźnie ogniskowej soczewki L_p . Jego powstawanie powoduje zwiększenie pola obserwacji, którego wymiar zdefiniowany jest przez dwa promienie o różnych długościach fal ulegające dyfrakcji na krawędziach modulatora SLM. Pole obserwacji generowane jest asymetrycznie względem osi z , ponieważ kąty dyfrakcyjne zależą od długości fal. Na Rys. 5-5 kolorem niebieskim zilustrowano pole obserwacji tęczowego wyświetlacza holograficznego. Dla porównania kolorem zielonym oznaczono pole obserwacji systemu opisanego w rozdziale 4. Zakładając, że widzialne długości fal mieszczą się w zakresie $[\lambda_{2B}, \lambda_{2R}]$ i oznaczając powiększony wymiar modulatora SLM przez B_{x_2} , wymiar obszaru obserwacji w kierunku pionowym ΔPO_{u_2} i wzdłużnym ΔPO_{z_2} w przybliżeniu przyosiowym wynosi:

$$\Delta PO_{u_2} = F_p \frac{(\lambda_2^R - \lambda_2^B)}{2m} \left[\frac{1}{d} + \frac{1}{\Delta} \right], \quad (5-2)$$

$$\Delta PO_{z_2} = B_{x_2} F_p \left[\frac{1}{B_{x_2} - \Delta PO_{u_2}} - \frac{1}{B_{x_2} + \Delta PO_{u_2}} \right]. \quad (5-3)$$

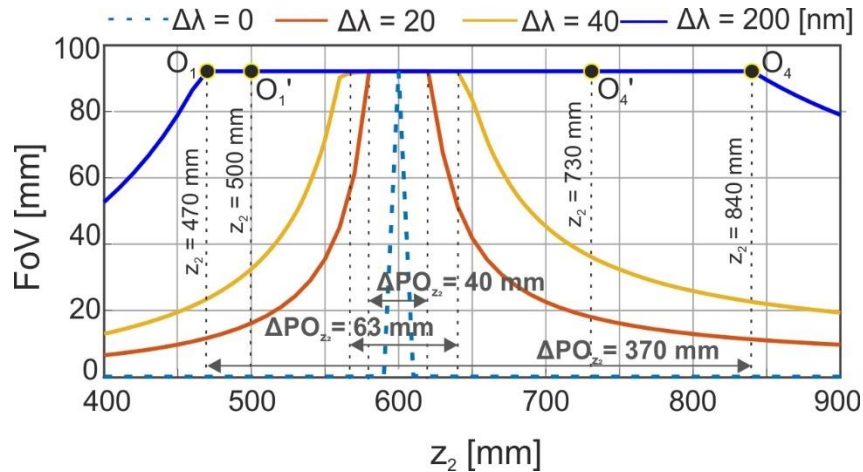
W artykule [79] przeprowadzona jest analiza Wignera percepcji wizualnej tęczowego wyświetlacza holograficznego, która pozwala na bardziej precyzyjne wyznaczenie wymiarów

obszaru obserwacji. W rozważaniach uwzględniona jest pozaosiowa geometria układu. Zakładając, że zakres spektralny diody światła białego wynosi między 460 nm a 660 nm, pole obserwacji w kierunku pionowym i wzdłużnym ograniczone jest przez punkty graniczne $O_1(0, 0, 470)$, $O_2(0, 10,25, 0)$, $O_3(0, -10,25, 0)$ i $O_4(0, 0, 840)$, a jego wymiar wynosi 20,5 mm w kierunku pionowym i 370 mm w kierunku wzdłużnym. Gdy oko użytkownika znajduje się wewnątrz obszaru zaznaczonego kolorem niebieskim obserwuje on obraz w pełnym polu widzenia FoV . Przesunięcie źrenicy poza pole obserwacji skutkuje ucinaniem fragmentów widoku.



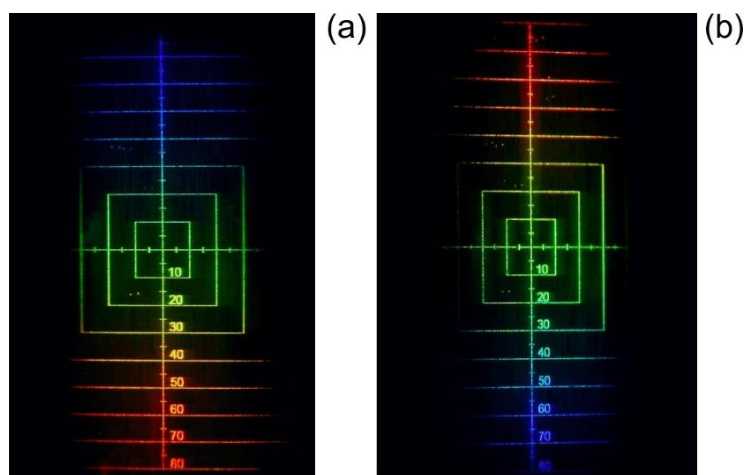
Rys. 5-5. Pole obserwacji tęczowego wyświetlacza holograficznego. Wektory k_2^{R+} oraz k_2^{B-} powiązane są kolejno z falami rekonstruującymi k_2^R i k_2^B przez kąt dyfrakcyjny modulatora SLM.

Wymiary pola obserwacji w tęczowym wyświetlaczu holograficznym z siatką dyfrakcyjną zależą od szerokości spektralnej użytego źródła światła. Na Rys. 5-6 przedstawiono wymiar obszaru w kierunku osi z_2 uzyskiwany dla źródeł o centralnej długości fali $\lambda_0 = 540$ nm i różnych szerokościach spektralnych $\Delta\lambda$. Analizowane są następujące źródła: laser ($\Delta\lambda = 0$ nm), monochromatyczne diody LED ($\Delta\lambda = 20$ nm i $\Delta\lambda = 40$ nm) oraz dioda światła białego ($\Delta\lambda = 200$ nm). Na wykresie zamieszczone są wartości pola widzenia FoV dla różnych punktów obserwacji wzdłuż osi z_2 . Punkty O_1 i O_4 oznaczają teoretycznie wyznaczone punkty graniczne definiujące wymiar obszaru obserwacji zaproponowanego systemu.



Rys. 5-6. Porównanie teoretycznych wartości pola widzenia, dla punktów obserwacji wzdłuż osi z_2 i źródeł światła o różnej szerokości spektralnej, z eksperymentalnie zmierzonymi wartościami otrzymanymi dla zbudowanego układu wyświetlacza.

Rzeczywiste położenie punktów granicznych zbudowanego wyświetlacza zmierzone jest eksperymentalnie. W tym celu hologram tęczy obrazu testowego 2D, wygenerowany w płaszczyźnie modulatora SLM dla $\lambda_2 = 540$ nm, jest optycznie rekonstruowany w układzie wyświetlacza. Obiekt testowy przedstawia kwadraty o różnej długości boków. Ich wymiary przedstawione są w milimetrowej skali. Wymiar największego kwadratu dobrany jest do wymiarów modulatora SLM. Na Rys. 5-7 znajdują się obrazy sfotografowane dla dwóch punktów granicznych O_1' oraz O_4' o współrzędnych kolejno $(0, 0, 500)$ i $(0, 0, 730)$. Dla oka znajdującego się poza polem wyznaczonym przez O_1' i O_4' obserwowany przedmiot zaczyna być ucinany.

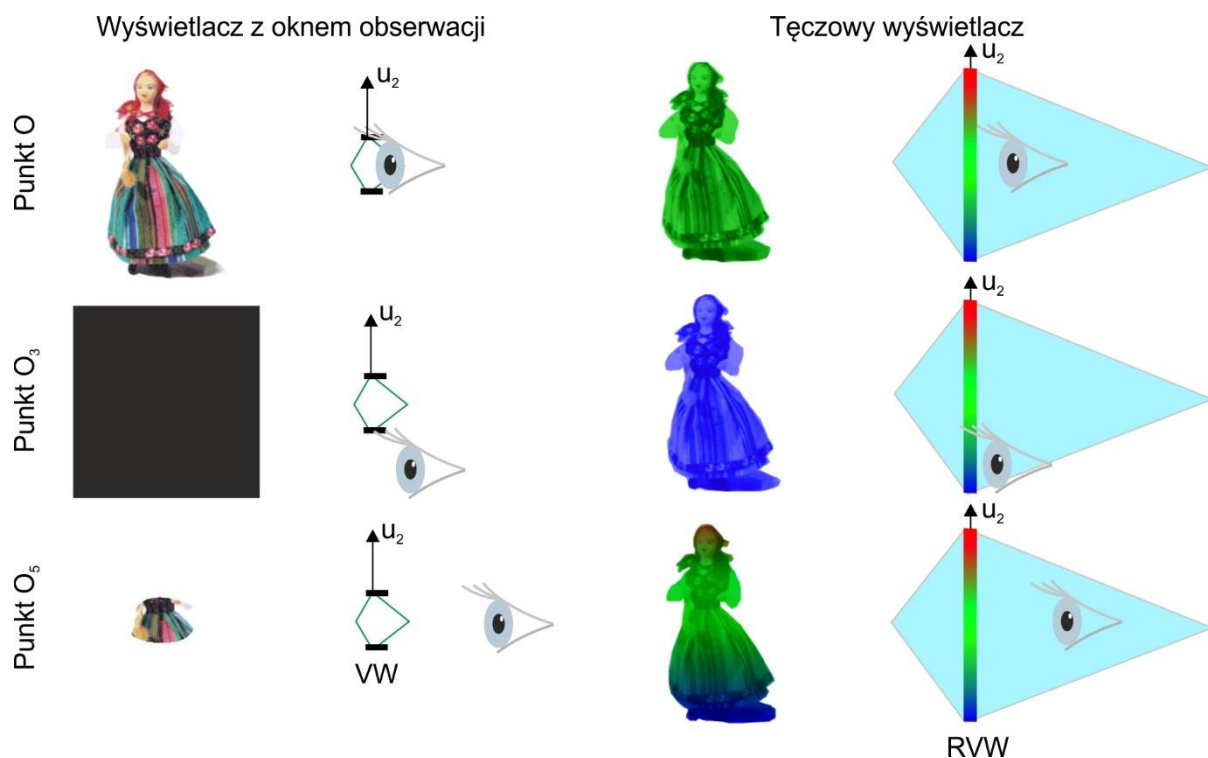


Rys. 5-7. Pole widzenia optycznych rekonstrukcji obiektu testowego zarejestrowanych na aparacie fotograficznym dla granicznych punktów obserwacji O_1' i O_4' .

Położenie punktów różni się od wartości wyznaczonych podczas analizy numerycznej. Różnice wynikają z niewystarczająco dużych średnic soczewek L_1 i L_2 . Z tego powodu punkty graniczne uzyskiwane są dla ograniczonego zakresu spektralnego źródła.

5.6. Właściwości spektralne obserwowanych obrazów

W porównaniu z wyświetlaczem z oknem obserwacji, tęczyowy wyświetlacz holograficzny zapewnia zwiększony kąt pola widzenia w kierunku pionowym. Dzięki temu charakteryzuje go wyższy komfort użytkownika. Różnice pomiędzy oboma systemami zaprezentowane są schematycznie na Rys. 5-8. Przedstawia on porównanie widoków otrzymywanych w obu układach dla trzech punktów obserwacji O , O_3 i O_5 zaznaczonych na Rys. 5-5.



Rys. 5-8. Porównanie widoków zrekonstruowanego obiektu, uzyskiwanych dla różnych punktów obserwacji w wyświetlaczu z oknem obserwacji oraz w tęczyowym wyświetlaczu holograficznym.

W wyświetlaczu holograficznym z oknem obserwacji oko użytkownika musi być precyzyjnie umieszczone w płaszczyźnie (u_2, v_2) w punkcie O . Tylko wtedy możliwe jest zobaczenie całego zrekonstruowanego obiektu. Przemieszczenie oka w płaszczyźnie pionowej do punktu O_3 powoduje zniknięcie obrazu. Gdy jest ono odsunięte od okna obserwacji w osi z (punkt O_5) tylko centralna część obiektu jest widoczna. Natomiast w tęczyowym wyświetlaczu holograficznym użytkownik ma możliwość swobodnego ruchu głową w kierunku pionowym

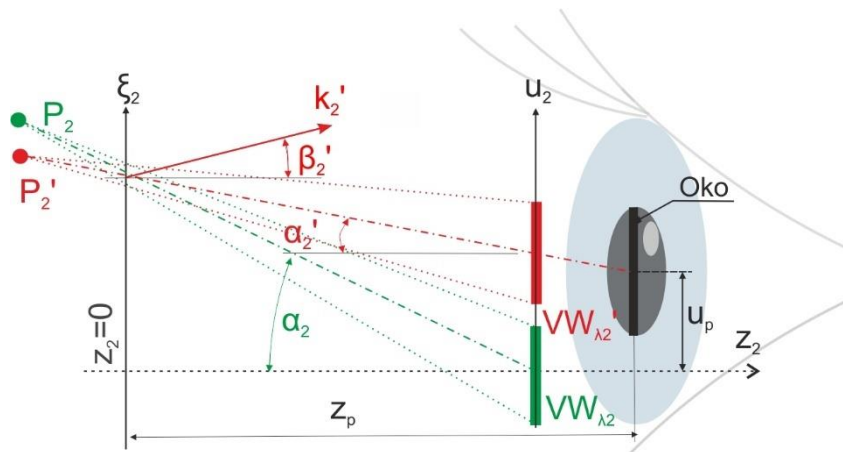
i wzdłużnym. Zakres ruchu, dla którego widoczny jest cały zrekonstruowany przedmiot, ograniczony jest przez wymiar tęczowego pola obserwacji (rozdział 5.4). Dla różnych pozycji oka w płaszczyźnie pionowej obserwowane są obrazy o różnych, pojedynczych barwach. Dla punktu O_3 cały przedmiot ma kolor niebieski. Gdy oko znajduje się poza płaszczyzną u_2 fragmenty rekonstruowanego przedmiotu widziane są w różnych barwach.

W tęczowym wyświetlaczu holograficznym rekonstruowany przedmiot widoczny jest w barwie, która zależy od umiejscowienia oka wewnątrz pola obserwacji. Rozdział ten przedstawia analizę tzw. rozmycia tęczowego, które oznacza zakres długości fal widzianych w obrazie przez użytkownika. W tym celu rozpatrywana jest geometria z Rys. 5-9, gdzie rekonstrukcja hologramu punktu P_2 o kątovej współrzędnej α_2 obserwowana jest z perspektywy α_2' . Dla wybranego kąta oko widzi punkt P_2' , który jest rekonstruowany przez falę płaską o kącie nachylenia β_2' i wektorze falowym k_2' . Uwzględniając powiększenie systemu m , wartość kąta zależna jest od rozpatrywanej długości fali λ_2' zgodnie z równaniem:

$$\beta_2' = \frac{(\lambda_2 - \lambda_2') \sin \theta}{m \lambda_2}. \quad (5-4)$$

W równaniu zastosowano przybliżenie przyosiowe wzdłuż osi optycznej układu. Ponieważ $\alpha_2' = \alpha_2 + \beta_2'$ długość fali obserwowanego punktu P_2' wynosi:

$$\lambda_2' = \lambda_2 + \frac{\lambda_2 M (\alpha_2 - \alpha_2')}{\sin \theta}. \quad (5-5)$$

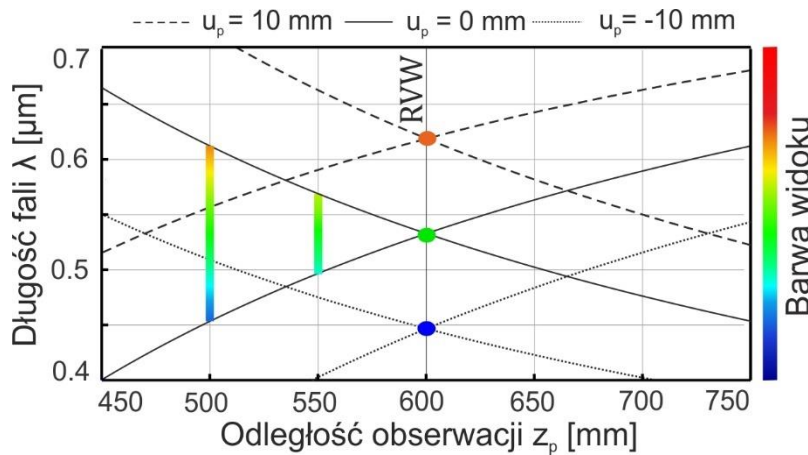


Rys. 5-9. Geometria wykorzystana do wyznaczenia zakresu spektralnego światła odbieranego przez obserwatora dla różnych punktów obserwacji wzdłuż osi z_2 .

Analizując dwa punkty graniczne $\pm \frac{1}{2} \text{FoV}$ o współrzędnych kątowych α_2 możliwe jest wyznaczenie rozmycia tęczowego obserwowanego obrazu. Dla oka umieszczonego na osi optycznej układu wyrażone jest ono wzorem:

$$\Delta \lambda_{oś} = \left| \frac{\text{FoV} \lambda_2 m (F_p z_p^{-1} - 1)}{\sin \theta} \right|. \quad (5-6)$$

Do wyznaczenia rozmycia tęczowego dla obserwacji poza osią optyczną układu należy skorzystać z równania (5-5). Pozwala ono wyznaczyć zakres długości fal widocznych punktów brzegowych przedmiotu, które mogą być wykorzystane do przeprowadzenia analizy rozmycia tęczowego. Uzyskane wyniki symulacji zostały przedstawione na Rys. 5-10. Analiza została przeprowadzona dla parametrów systemu opisanego w rozdziale 5.2 oraz dla trzech płaszczyzn: $u_p = 10$ mm (linia kropkowana), $u_p = 0$ mm (linia ciągła), $u_p = -10$ mm (linia przerywana).

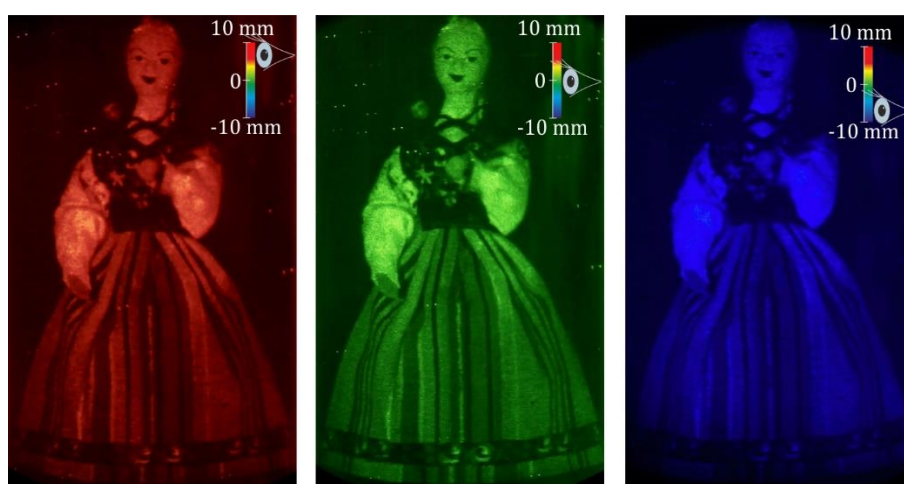


Rys. 5-10. Ilustracja zakresu spektralnego obserwowanego obrazu dla różnych położenia oka wzdłuż osi z_2 .

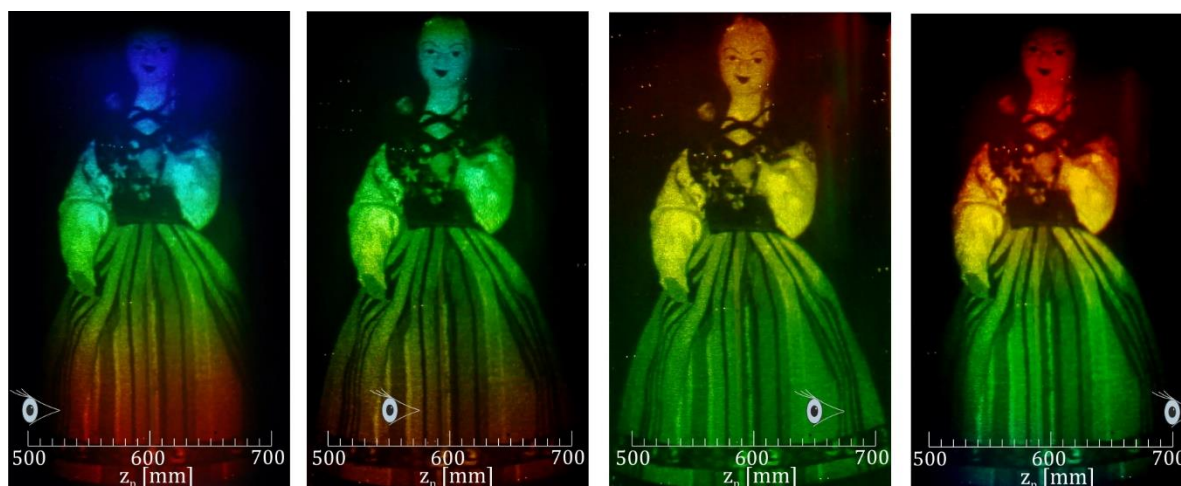
Zamieszone wyniki pokazują, że gdy oko obserwatora znajduje się w płaszczyźnie u_2 cały obraz widziany jest w pojedynczej barwie. Na wykresie kropkami zaznaczone są barwy otrzymywane dla punktów O, O₂ oraz O₃ z Rys. 5-5. Natomiast gdy oko umieszone jest poza tęczowym oknem obserwacji fragmenty obrazu 3D widoczne są w różnych barwach tęczy. Zakres spektralny światła odbierany przez oko użytkownika zależy od jego położenia wewnątrz pola obserwacji. Dla przykładu, w punkcie obserwacji o współrzędnych (0, 0, 500) widok zawiera barwy z zakresu spektralnego 455 nm – 610 nm.

Przeprowadzone symulacje weryfikowane są eksperymentalnie. W tym celu optyczna rekonstrukcja tęczowego hologramu lalki łowickiej z rozdziału 5.4 jest fotografowana dla różnych położenia aparatu wewnątrz tęczowego pola obserwacji. Pozyccje dobrane są w taki sposób, żeby zademonstrować spektralne właściwości widoków otrzymywanych dla różnych położenia oka obserwatora. Rys. 5-11 pokazuje zapisane obrazy dla trzech różnych, pionowych pozycji kamery w płaszczyźnie tęczowego okna obserwacji. Odpowiadają one punktom O, O₂ i O₃ z Rys. 5-5. Dla wybranych położenia widoczne są jednobarwne rekonstrukcje holograficzne. Zielona barwa otrzymywana jest dla centralnego punktu O, niebieska dla dolnego O₃, a czerwona dla górnego O₂. Uzyskane wyniki pokrywają się z punktami zaznaczonymi na Rys. 5-10. Warto wspomnieć, że podczas poruszania głową w górę i dół obserwuje się ciągłą

zmianę barwy. Zakres ruchu ograniczony jest przez wymiar tęczowego okna obserwacji, który dla przedstawionego układu wynosi 20,5 mm. Rys. 5-12 ilustruje obrazy zapisane dla czterech poosiowych położań kamery ($z_p = 500$ mm, 550 mm, 600 mm i 650 mm) wewnątrz pola obserwacji. Gdy aparat znajduje się poza płaszczyzną u_2 widoczne są wielobarwne rekonstrukcje. W zależności od pozycji kamery różne części obrazu widziane są w zmiennych barwach. Warto zauważyć, że po przeciwległych stronach od tęczowego okna obserwacji barwy są względem siebie odwrócone (dla odległości $z_p = 500$ mm górna część obrazu jest niebieska, a dla $z_p = 700$ mm czerwona). Dodatkowo dla punktów $z_p = 500$ mm i $z_p = 700$ mm fragmenty zrekonstruowanego przedmiotu w kierunku poziomym przestają być widoczne.



Rys. 5-11. Optyczna rekonstrukcja tęczowego hologramu łowiczanki sfotografowana dla trzech punktów obserwacji (O_2 , O i O_3) położonych w płaszczyźnie u_2 .

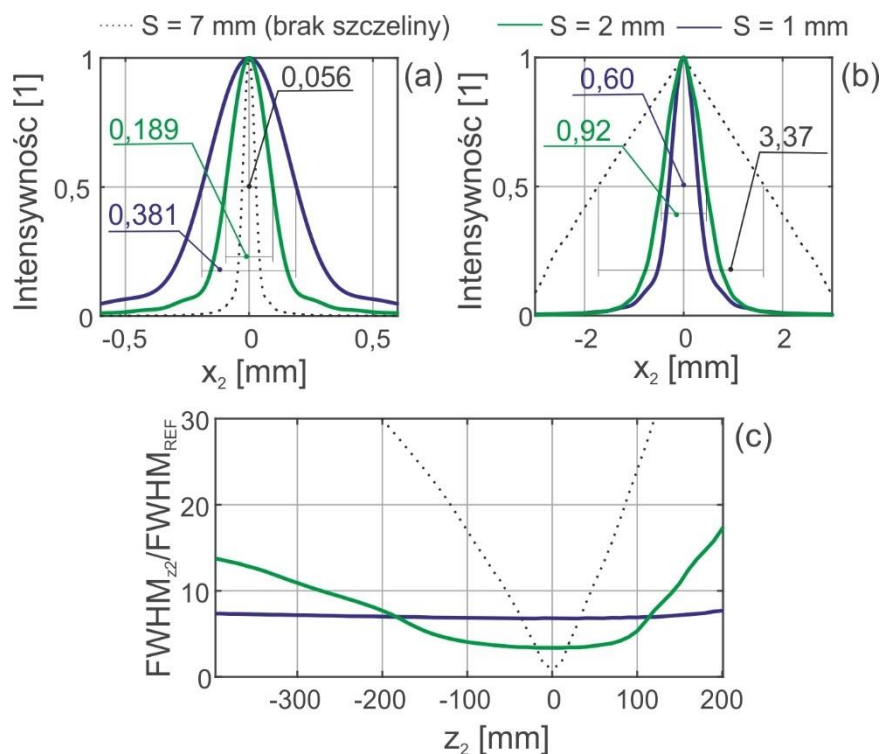


Rys. 5-12. Optyczna rekonstrukcja tęczowego hologramu łowiczanki, sfotografowana dla kamery położonej poza płaszczyzną u_2 w czterech punktach wzdłuż osi z_2 .

5.7. Wpływ wymiaru szczeliny na rozdzielczość i głębię rekonstrukcji

Wymiar szczeliny nakładanej na hologram tęczy w procesie generacji ma wpływ na rozdzielczość oraz głębię rekonstruowanego przedmiotu. Powinien być on dobrany w zależności od odległości obiektu od płaszczyzny hologramu końcowego. W rozdziale tym przeprowadzona jest analiza numeryczna, której celem jest zbadanie wpływu wymiaru szczeliny na właściwości obrazu. Następnie efekt ten jest rozpatrywany eksperymentalnie. W pierwszym kroku wykonywana jest symulacja procesu obserwacji hologramów, które wygenerowane są dla trzech wymiarów szczeliny S : 7 mm (brak szczeliny), 2 mm i 1 mm. Obiektem testowym jest pojedynczy punkt umieszczony w różnych odległościach od płaszczyzny ξ_2 . Oko obserwatora traktowane jest jako czteromilimetrowa apertura umieszczona w płaszczyźnie u_2 . Dla każdego hologramu wyznaczana jest suma intensywności zrekonstruowanych wiązek dla różnych długości fal, które docierają do źrenicy oka. Obliczenia wykonane są dla zakresu spektralnego diody światła białego z próbkowaniem równym 0,1 nm. Następnie wyznaczana jest szerokość połówkowa $FWHM$ (ang. *full width at half maximum*) uzyskanego rozkładu intensywności. Na Rys. 5-13(a) zamieszczone są wyniki rekonstrukcji punktu zlokalizowanego w płaszczyźnie obrazowej modulatora SLM. Pokazują one spadek rozdzielczości obrazu wraz ze zmniejszaniem wysokości szczeliny. Rys. 5-13(b) zawiera rezultaty otrzymane w odległości $z_2 = -300$ mm od płaszczyzny ξ_2 . Przedstawione wyniki dowodzą, że dla małych wartości S jakość rekonstrukcji przedmiotów o dużej głębi jest wyższa. Na obu wykresach podane są wyznaczone wartości $FWHM$.

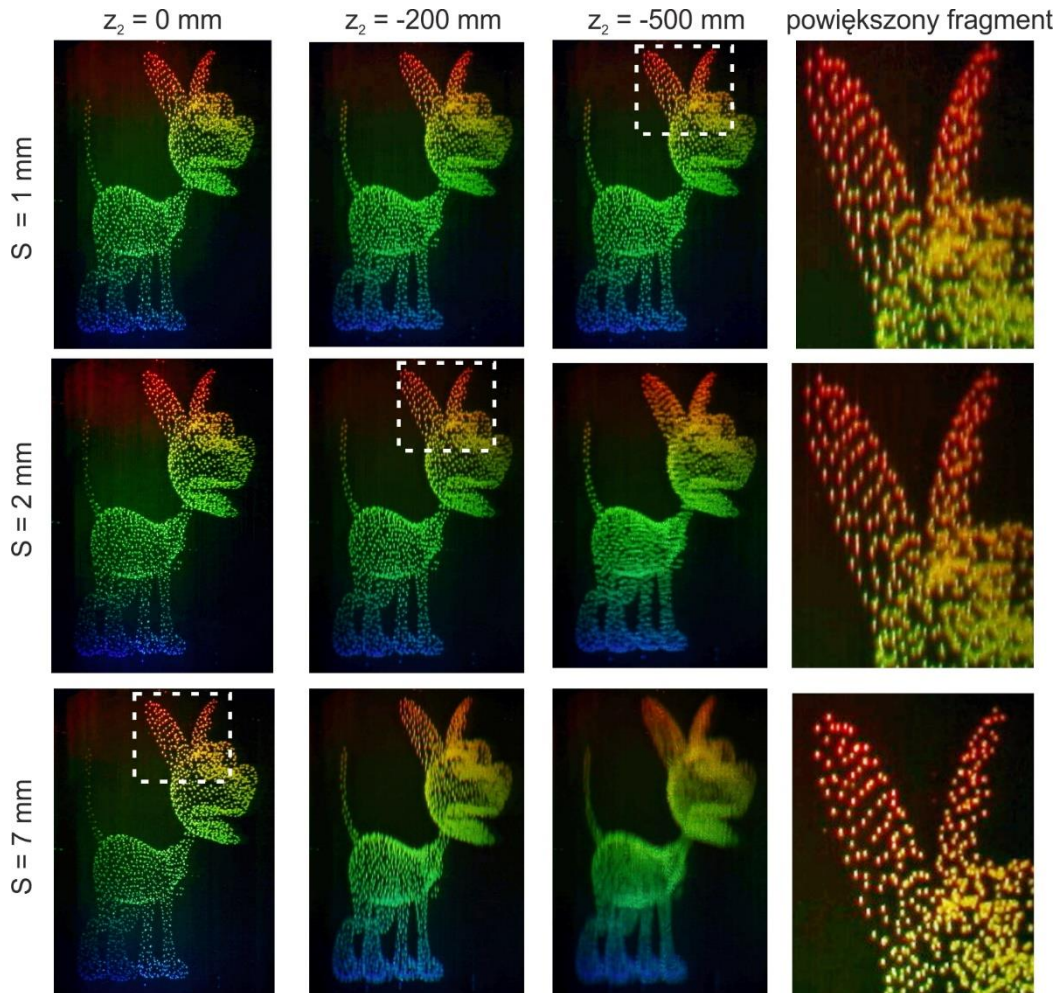
Na Rys. 5-13(c) zamieszczone są wyniki całej przeprowadzonej symulacji. Wykresy pokazują zmianę rozdzielczości obrazu punktu, który rekonstruowany jest na różnych odległościach z_2 (w zakresie od -400 mm do 200 mm) oraz dla wybranych wymiarów szczeliny S . Analiza realizowana jest przez wyznaczenie stosunku $FWHM/FWHM_{REF}$ dla każdej odległości z_2 . Indeks $_{REF}$ oznaczona jest szerokość połówkowa uzyskiwana dla rekonstrukcji punktu w płaszczyźnie modulatora SLM, bez nałożonej szczeliny na hologram. Dla $S = 7$ mm stosunek $FWHM_{z_2}/FWHM_{REF}$ wyznaczony dla $z_2 = -300$ mm i $z_2 = 0$ mm, wynosi kolejno 40 i 1. Dla szczeliny o wymiarze $S = 2$ mm wynosi on odpowiednio 11 i 3,4, a dla $S = 1$ mm jest on prawie stały i równy 7.



Rys. 5-13. Wyniki symulacji wymiaru punktu obserwowanego przez użytkownika, zrekonstruowanego w (a) płaszczyźnie modulatora SLM oraz (b) w odległości $z_2 = -300$ mm. (c) Ilustracja zmiany rozdzielczości obrazu w funkcji odległości rekonstrukcji, rozumianej jako stosunek $FWHM/FWHM_{REF}$.

W drugim kroku wpływ wymiaru szczeliny nakładanej na hologram tęczy na rozdzielczość i głębię rekonstrukcji badany jest eksperymentalnie. W tym celu tworzony jest zbiór hologramów tęczy wygenerowanych dla trzech wysokości szczeliny S (1 mm, 2 mm i 7 mm) oraz trzech odległości rekonstrukcji z_2 (0 mm, -200 mm, -500 mm). Parametry S i z_2 dobrane są w taki sposób, żeby zademonstrować wpływ efektu szczeliny na zwiększenie głębi kosztem spadku rozdzielczości. Obiektem testowym jest komputerowy model 3D psa, który składa się z chmury punktów. Przedmiot złożony jest z 7000 punktów i na odległości $R_2 = 600$ mm ma wymiary: 70 mm wysokości, 50 mm szerokości oraz 25 mm głębokości. Przedmiot zbudowany z punktów doskonale nadaje się do oceny jakości obrazowania, ponieważ ich rozmycie jest miarą spadku rozdzielczości. Następnie każdy hologram rekonstruowany jest optycznie. Odtworzony obiekt rejestrowany jest z wykorzystaniem aparatu fotograficznego. Uzyskane wyniki zamieszczone są na Rys. 5-14. Fragmenty oznaczone przerywanym prostokątem zostały powiększone. Rezultaty pokazują, że zmiana wysokości szczeliny daje możliwość kontroli rozdzielczości i głębi zrekonstruowanych przedmiotów. Dla dużych odległości od płaszczyzny modulatora nałożenie szczeliny na hologram poprawia

jakość obserwowanych obrazów. Dla szczeliny $S = 7$ mm głębia jest bardzo mała. Natomiast dla $S = 1$ jest ona zwiększona. Wzrost głębi odbywa się kosztem rozdzielczości obiektu w płaszczyźnie modulatora SLM.



Rys. 5-14. Ilustracja wpływu wymiaru szczeliny na rozdzielczość i głębię rekonstrukcji komputerowo generowanego tęczowego hologramu modelu psa złożonego z chmury punktów.

5.8. Podsumowanie

Omówiony w tym rozdziale tęczowy wyświetlacz holograficzny pozwala na uzyskanie wysokiej jakości rekonstrukcji dużych obiektów 3D, które obserwowane mogą być gołym okiem w rozszerzonym kącie pola widzenia. Pomimo, że system nie rekonstruuje rzeczywistej barwy przedmiotu zapewnia on atrakcyjne obrazy, których barwa zmienia się wraz z położeniem oka użytkownika. Dla różnych pozycji pionowych w płaszczyźnie tęczowego okna obserwacji uzyskiwane są jednobarwne widoki. Gdy oko jest od niej odsunięte w osi z otrzymywane są wielobarwne rekonstrukcje. Zakres ruchu, dla którego obserwowany jest cały

przedmiot, ograniczony jest przez wymiar pola obserwacji i wynosi 20,5 mm w kierunku pionowym oraz 230 mm w kierunku wzdłużnym.

W opracowanym wyświetlaczu efekt tęczy wprowadzany jest przez moduł oświetlający zbudowany z zastosowaniem wysokoczęstotliwościowej siatki dyfrakcyjnej oświetlonej przez źródło światła białego w postaci diody LED. W układzie wykorzystywany jest fazowy modulator SLM, który adresowany jest przez tęczowy hologram. Tworzony jest on przez bezpośrednie nałożenie szczeliny na komputerowo generowany hologram wirtualnego obiektu 3D lub na cyfrowy hologram rzeczywistego obiektu zapisany w bezsoczewkowym układzie rejestracji Fouriera.

Wymiar szczeliny nakładanej na hologram tęczowy daje możliwość kontroli rozdzielczości oraz głębi rekonstrukcji holograficznych. Dla dużych odległości przedmiotu od płaszczyzny modulatora nałożenie szczeliny na hologram poprawia jakość obserwowanych obrazów. Jednak wzrost głębi odbywa się kosztem rozdzielczości obiektu. Z tego powodu dla przedmiotów położonych blisko płaszczyzny hologramu końcowego najlepiej zastosować duży wymiar szczeliny, a dla przedmiotów położonych daleko odwrotnie.

6. Barwny wyświetlacz holograficzny z binarnym modulatorem DMD i oświetleniem niekoherentnym.

System tęczowego wyświetlacza holograficznego, opisany w poprzednim rozdziale, pozwala na rekonstrukcję dużych obiektów 3D oraz ich obserwację w zwiększonym kącie pola widzenia w kierunku pionowym. Jednak charakteryzuje go ograniczony kąt w kierunku poziomym. Z tego powodu w układzie niemożliwa jest obserwacja poziomej paralaksy przedmiotu. W literaturze znaleźć można szereg rozwiązań tego problemu. Omówione są one w rozdziale 2.2. Wśród opisanych metod szczególnie interesująca jest często używana technika multipleksingu czasowego, która zapewnia największy przyrost SBP wyświetlacza. Jest ona stosowana do uzyskania obserwacji przedmiotu w pełnym kącie pola widzenia [41, 42]. Wymienione rozwiązania wykorzystują modulator DMD oraz laserowe źródło światła. Skutkuje to powstawaniem koherentnego szumu plamkowego, który obniża jakość rekonstruowanych obrazów. Dodatkowo panel DMD jest urządzeniem binarnym, które pracuje w wysokim rzędzie dyfrakcyjnym [81 - 83]. Dlatego obraz odtworzony z jego użyciem zaburzony jest przez sąsiednie rzędy. Rozwiązaniem wymienionych problemów jest zastosowanie niekoherentnego źródła światła. Jak wykazano w rozdziałach 3 – 5 budowa wyświetlacza holograficznego z zastosowaniem diody LED i fazowego modulatora SLM pozwala na uzyskanie wysokiej jakości oraz dużej głębi rekonstrukcji. Jednak właściwości binarnego DMD różnią się od właściwości fazowego SLM zbudowanego z ciekłych kryształów. W związku z tym, że DMD pracuje w wysokim rzędzie dyfrakcyjnym, oświetlenie go niekoherentnym źródłem światła skutkuje powstawaniem dużej dyspersji, która jest główną przyczyną spadku jakości obrazowania.

W wyświetlaczach holograficznych z DMD i oświetleniem niekoherentnym, które znaleźć można w literaturze, efekt dyspersji światła odbitego od powierzchni modulatora minimalizowany jest przez zastosowanie filtra spektralnego [84, 85]. Jednak takie rozwiązanie skutkuje znaczącym spadkiem mocy źródła, która jest kluczowa dla technik z multipleksingiem czasowym. Przedstawiony w tym rozdziale system wyświetlacza holograficznego z modulatorem DMD zrealizowany jest z wykorzystaniem opracowanej metody korekcji dyspersji. Pozwala ona zminimalizować wpływ koherencji czasowej źródła światła na jakość rekonstruowanych obrazów. Technika wykorzystuje specjalnie zaprojektowany moduł oświetlający matrycę DMD. Wprowadza on wiązkę kompensującą o przeciwnej do modulatora dyspersji, która generowana jest przez siatkę dyfrakcyjną umieszczoną przed jego

powierzchnią. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe jest uzyskanie barwnych rekonstrukcji dużych obiektów 3D o wysokiej rozdzielczości, zredukowanym szumie plamkowym oraz głębi porównywalnej do tej, która osiągana jest z zastosowaniem fazowego modulatora SLM.

6.1. Właściwości dyfrakcyjne modulatora DMD

Fazowy modulator SLM i binarny modulator DMD mają porównywalny wymiar piksela. Z tego powodu umożliwiają uzyskanie prawie jednakowej rozdzielczości rekonstrukcji. Oba urządzenia mogą być rozpatrywane jako siatka dyfrakcyjna spełniająca równanie:

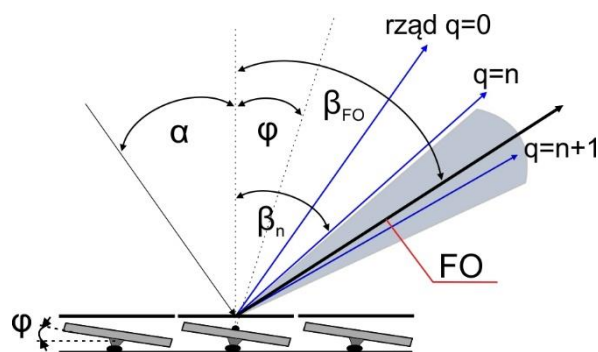
$$\sin(\beta) = \frac{q\lambda}{\Delta} - \sin(\alpha), \quad (6-1)$$

gdzie α i β oznaczają kolejno kąt padania i odbicia, q rząd dyfrakcyjny, λ długość fali, a Δ wymiar piksela modulatora. W wyświetlaczu holograficznym z fazowym modulatorem SLM kąt oświetlenia może być dowolny [86]. Natomiast dla panelu DMD kąt ten musi być odpowiednio dobrany. Inaczej wydajność dyfrakcyjna systemu jest niska [81].

Każdy piksel modulatora DMD jest mikrozwierciadłem, które może przyjmować dwa stany odpowiadające kątowi pochylenia $\pm 12^\circ$. Z tego powodu DMD jest specjalnym rodzajem siatki dyfrakcyjnej, w której intensywność światła w rzędach dyfrakcyjnych q modulowana jest przez funkcję obwiedni FO . Jej położenie katowe β_{FO} zależy od kąta padania α oraz kąta pochyłu zwierciadeł φ :

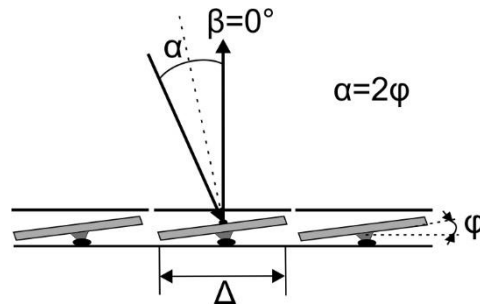
$$\beta_{FO} = 2\varphi + \alpha. \quad (6-2)$$

Schemat efektu modulacji zamieszczony jest na Rys. 6-1. Gdy położenie rzędu dyfrakcyjnego pokrywa się z funkcją obwiedni cała intensywność odbitego światła znajduje się tylko w tym rzędzie. W pozostałych rzędach intensywność jest równa zero. Dla przedstawionego przypadku prawie cała energia wiązki odbitej od powierzchni DMD umieszczona jest w rzędzie $q = n + 1$;



Rys. 6-1. Schemat efektu modulacji intensywności światła w rzędach dyfrakcyjnych q (kolor niebieski) modulatora DMD przez funkcję obwiedni FO (szary obszar).

Właściwości dyfrakcyjne modulatora DMD (wymiar piksela $\Delta = 10,75 \mu\text{m}$) zbadane są za pomocą symulacji komputerowych, które wykorzystują rozszerzoną teorię dyfrakcji skalarnej [87]. Przeprowadzona analiza demonstruje wpływ kąta oświetlenia i długości fali na rozkład intensywności w rzędach dyfrakcyjnych modulatora. Rozpatrywany jest przypadek siatki 1D, której schemat oświetlenia pokazany jest na Rys. 6-2.

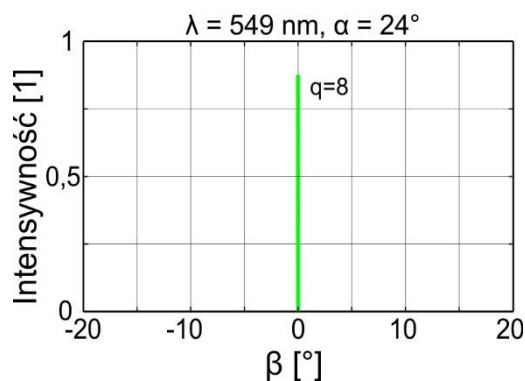


Rys. 6-2. Schemat oświetlenia wykorzystywany w opracowanym systemie wyświetlacza holograficznego.

Geometria układu bazuje na konfiguracji, w której wiązka odbita od modulatora propaguje się normalnie do jego powierzchni. W tym celu modulator DMD musi być oświetlony pod odpowiednim kątem α . Dla rozpatrywanego przypadku ($\alpha = -2\varphi$) warunek wzmocnienia spełniony jest, gdy:

$$\lambda = \frac{\Delta}{q} \sin \alpha. \quad (6-3)$$

Z wzoru wynika, że dla danego q jest on osiągnięty jedynie dla jednej długości fali. Rys. 6-3 pokazuje wyniki symulacji dyfrakcji światła na powierzchni modulatora DMD dla następujących parametrów: $q = 8$, $\alpha = 24^\circ$ oraz $\beta = 0^\circ$.

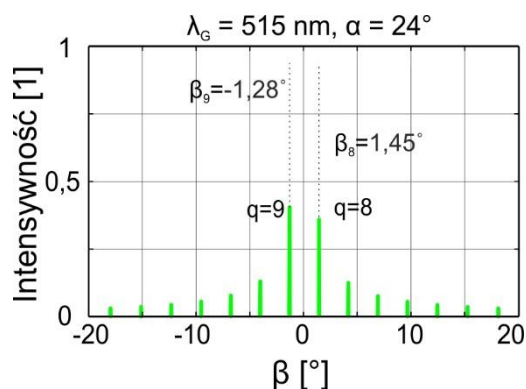


Rys. 6-3. Znormalizowany rozkład intensywności w rzędach dyfrakcyjnych DMD dla spełnionego warunku wzmocnienia. Parametry symulacji: $q = 8$, $\alpha = 24^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $\lambda = 549 \text{ nm}$.

W analizowanym przypadku cała energia światła odbitego od powierzchni DMD skupiona jest w jednym rzędzie dyfrakcyjnym dla $\lambda = 549 \text{ nm}$. Analogicznie dla rzędów $q = 7$ i $q = 9$

warunek wzmocnienia spełniony jest dla λ równej kolejno: 628 nm oraz 488 nm. Uzyskane wartości wskazują, że dla widzialnego zakresu spektralnego modulator DMD pracuje w wysokich rzędach dyfrakcyjnych.

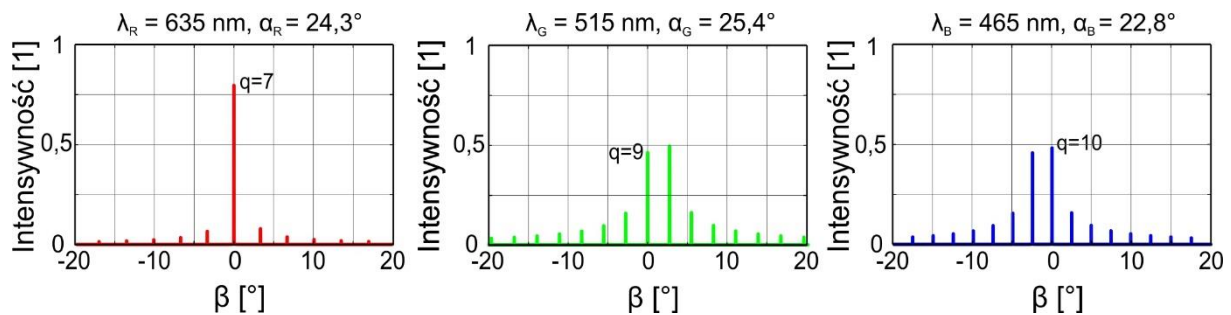
Zaproponowany układ wyświetlacza wykorzystuje trzy diody LED RGB (DoricLenses, wymiar rdzenia światłowodu 960 μm , apertura numeryczna NA 0.5), których centralne długości fal ($\lambda_R = 635$ nm, $\lambda_G = 515$ nm, $\lambda_B = 465$ nm) różnią się od wyznaczonych wartości λ , dla których spełniony jest warunek wzmocnienia. Rozpatrzmy monochromatyczne źródło światła o długości fali równej centralnej długości fali zielonej diody LED ($\lambda_G = 515$ nm) oświetlające modulator pod kątem $\alpha = -2\varphi$. Rys. 6-4 przedstawia uzyskane wyniki symulacji. Z rysunku widać, że energia światła odbitego od DMD nie jest skupiona w jednym, ale rozkłada się na wiele rzędów dyfrakcyjnych. Dla zademonstrowanego przypadku najwyższa intensywność uzyskiwana jest dla rzędów $q = 8$ i 9 . Kąt β_8 rozpatrywanego w symulacji rzędu dyfrakcyjnego jest różny od zera i wynosi $1,45^\circ$. Więcej energii skupionej jest w rzędzie 9, dla którego kąt β_9 wynosi $-1,28^\circ$. Zgodnie z równaniem (6-1), istnieje możliwość uzyskania normalnego kierunku propagacji wiązki odbitej od płaszczyzny modulatora ($\beta_q = 0^\circ$) poprzez zmianę kąta oświetlenia α .



Rys. 6-4. Znormalizowany rozkład intensywności w rzędach dyfrakcyjnych DMD, dla oświetlenia modulatora źródłem światła o centralnej długości fali $\lambda_G = 515$ nm pod kątem $\alpha = 24^\circ$.

Opisany w tym rozdziale system rekonstrukcji wykorzystuje trzy diody RGB. Optymalną konfiguracją barwnego wyświetlacza holograficznego z wieloma źródłami światła jest zapewnienie tego samego kąta $\beta = 0^\circ$ dla wszystkich źródeł. Dzięki temu możliwe jest nałożenie na siebie komponentów RGB w płaszczyźnie rekonstrukcji. Przeprowadzone symulacje pozwalają na wyznaczenie kątów oświetlenia, dla których wybrany rząd dyfrakcyjny propaguje się normalnie do płaszczyzny DMD oraz pracuje z wysoką wydajnością dyfrakcyjną. Wynoszą one $\alpha_R = 24,3^\circ$, $\alpha_G = 25,4^\circ$ i $\alpha_B = 22,8^\circ$, dla rzędów dyfrakcyjnych 7, 9 i 10. Wyniki analizy dla wymienionych parametrów przedstawione są na Rys. 6-5. Z wykresów widać, że najwyższa

wydajność dyfrakcyjna uzyskiwana jest dla diody czerwonej. Jest to spowodowane tym, że kąt dyfrakcyjny β_7 dla λ_R jest prawie taki sam jak kąt dyfrakcyjny funkcji obwiedni β_{FO} .



Rys. 6-5. Znormalizowany rozkład intensywności w rzędach dyfrakcyjnych dla parametrów układu rekonstrukcji z trzema diodami RGB.

Uzyskane wyniki symulacji udowadniają, że stosując odpowiednio dobrane kąty oświetlenia można uzyskać normalny kierunek propagacji wiązki odbitej od płaszczyzny modulatora DMD dla centralnych długości fal diod RGB. Niestety dla diody zielonej i niebieskiej znaczna część energii jest kierowana do sąsiedniego rzędu dyfrakcyjnego.

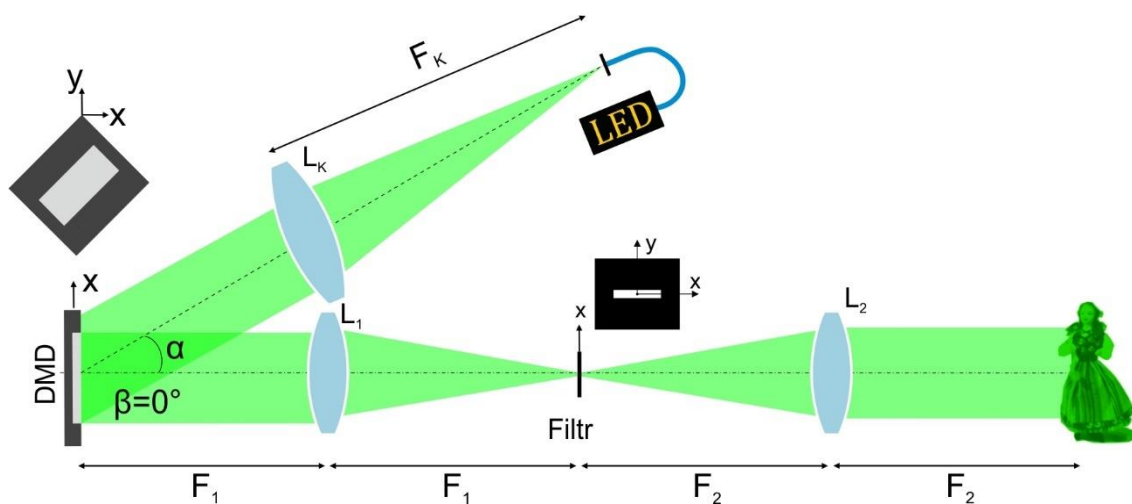
6.2. Budowa wyświetlacza holograficznego z modulatorem DMD i niekoherentnym źródłem LED

Zbudowany układ wyświetlacza holograficznego z modulatorem DMD i diodą LED zaprezentowany jest na Rys. 6-6. Składa się on z modułu oświetlającego i obrazującego. W pierwszym module niekoherentne źródło światła umieszczone jest w płaszczyźnie ogniskowej soczewki kolimującej K ($F_K = 400$ mm). Za nią tworzona jest wiązka o płaskim czole falowym, która oświetla binarny modulator DMD (DLP LightCrafter 6500, wymiar piksela $\Delta = 7,6$ μm , rozdzielczość 1920×1080) pod kątem α . Wartość kąta dobrana jest w taki sposób, żeby zapewnić normalną propagację wiązki odbitej od jego powierzchni (rozdział 6.1). W celu uproszczenia konstrukcji układu wyświetlacza, oś optyczna wiązki oświetlającej i obrazującej znajduje się w tej samej płaszczyźnie poziomej. Wymaga to obrotu modulatora o 45° wokół osi x . W konsekwencji piksele DMD mają kształt rombów, a ich wymiar wynosi $\Delta = 10,75$ μm . Moduł obrazujący zbudowany jest z dwóch soczewek L_1 ($F_1 = 200$ mm) i L_2 ($F_2 = 200$ mm). Tworzą one obraz przedmiotu o powiększeniu $m = -1$. W płaszczyźnie Fouriera modulatora DMD umieszczony jest filtr absorpcyjny, który pozwala na rekonstrukcję amplitudy zespolonej obiektu zakodowanej w binarnym hologramie. Jego metoda generacji opisana jest w rozdziale 6.3. Geometria filtra dopasowana jest do kształtu rzędu informacyjnego w płaszczyźnie

Fouriera soczewki L_1 . Dla niekoherentnego źródła światła jest on linią, której szerokość zależy od koherencji czasowej źródła, rzędu dyfrakcyjnego oraz dyspersji modulatora DMD.

Zaprezentowany system zbudowany jest w konfiguracji umożliwiającej rekonstrukcję zespolonej amplitudy obiektu 3D z powiększeniem 1:1. Taka konstrukcja pozwala na wierną ilustrację właściwości obrazowania systemu przez bezpośrednią rejestrację odtworzonych obrazów przedmiotu na kamerze CCD.

W systemie stosowane są trzy źródła światła RGB. Kąty oświetlenia DMD dla wykorzystanych diod wynoszą kolejno: $\alpha_R = 24,3^\circ$, $\alpha_G = 25,4^\circ$ i $\alpha_B = 22,8^\circ$. Wszystkie wiązki przedmiotowe propagują się normalnie do płaszczyzny panelu umożliwiając uzyskanie barwnej rekonstrukcji w płaszczyźnie obrazowej wyświetlacza. Barwa otrzymywana jest w wyświetlaczu z zastosowaniem techniki multipleksingu czasowego. Synchronizacja pomiędzy modulatorem, a diodami RGB LED uzyskiwana jest z wykorzystaniem sygnału sterującego, który generowany jest przez sterownik DMD. Wymiar obrazu ograniczony jest przez wymiary użytego modulatora i wynosi 14,6 mm szerokości i 8,2 mm wysokości. Objętość przedmiotu wyśrodkowana jest wokół płaszczyzny obrazu modulatora. Jego głębokość zależy głównie od koherencji czasowej użytego źródła. Dla zastosowanych diod RGB o szerokościach spektralnych $\Delta\lambda_R = 20$ nm, $\Delta\lambda_G = 35$ nm, $\Delta\lambda_B = 25$ nm została ona zmierzona eksperymentalnie i wnosi kolejno około: 40 mm, 20 mm i 10 mm.

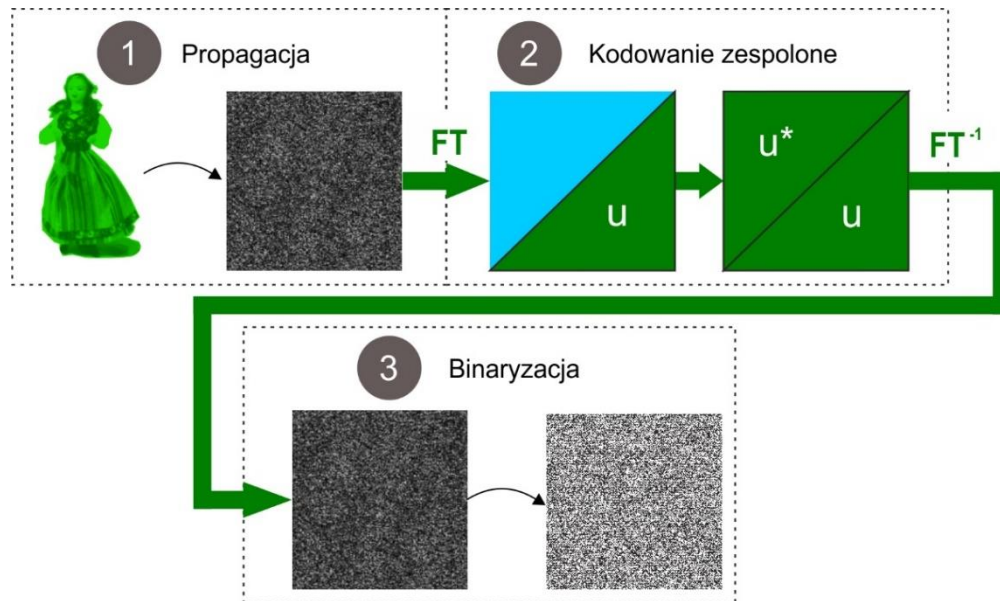


Rys. 6.6. Schemat budowy wyświetlacza holograficznego z modulatorem DMD i diodą LED.

6.3. Metoda generacji hologramu binarnego

Schemat metody generacji hologramu wyświetlanego na DMD zilustrowany jest na Rys. 6-7. Danymi wejściowymi algorytmu jest obiekt 3D generowany komputerowo lub rzeczywisty przedmiot. Danymi wyjściowymi jest binarny hologram. Jego generacja odbywa

się w trzech głównych etapach. W pierwszym wybrany przedmiot propagowany jest do płaszczyzny hologramu z wykorzystaniem metody rozkładu na fale płaskie [60]. W drugim powstała amplituda zespolona zapisywana jest w fazowym hologramie z zastosowaniem zmodyfikowanego schematu kodowania, którego podstawowa wersja opisana jest w rozdziale 3.4. Wprowadzona zmiana polega na uwzględnieniu kształtu mikrozwierciadeł modulatora DMD. Realizowane jest to przez ograniczenie częstotliwości hologramu f , w procesie generacji, w kierunku zgodnym z jego przekątną. W ostatnim kroku hologram jest binaryzowany.

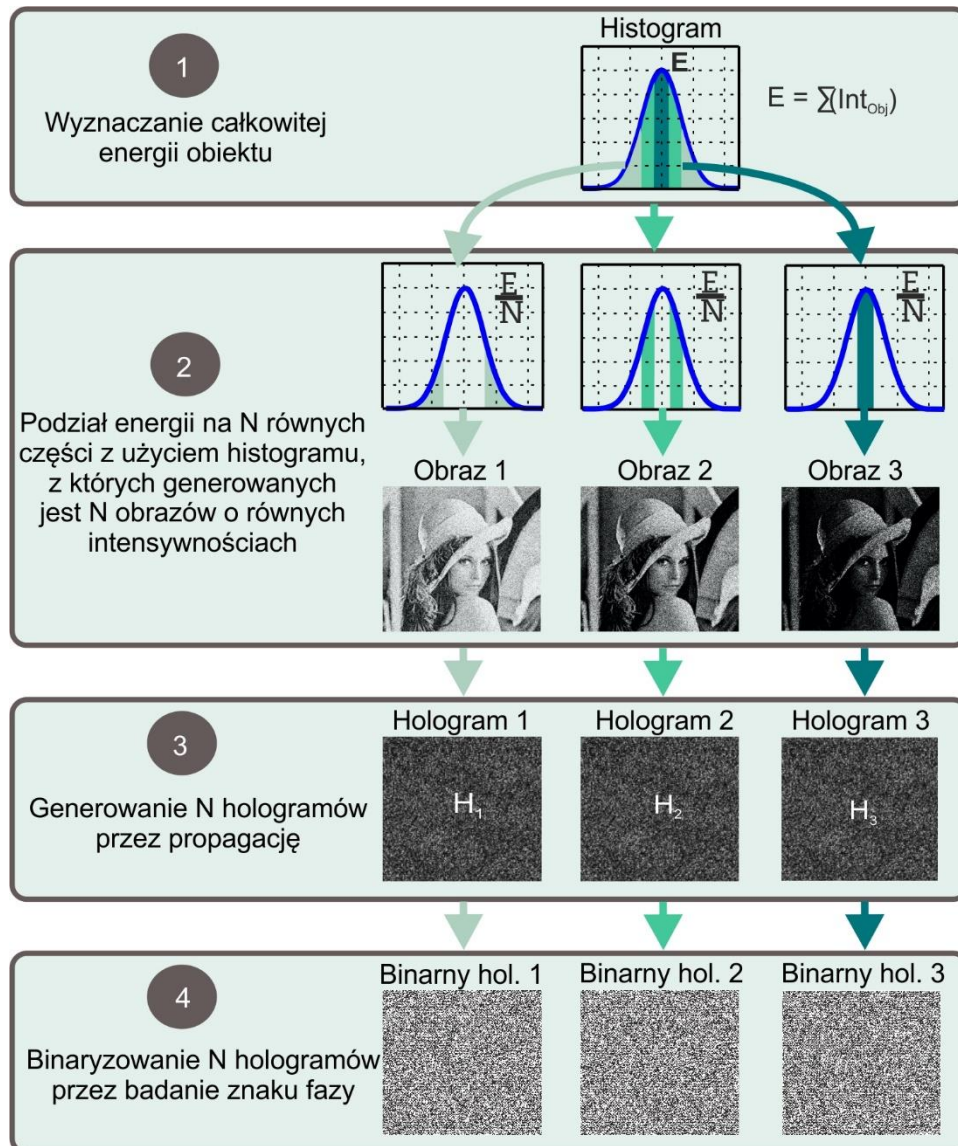


Rys. 6-7. Schemat metody generacji hologramu binarnego wyświetlanego na modulatorze DMD.

Trzeci krok algorytmu realizowany może być z zastosowaniem metod zaprezentowanych w literaturze [88 - 92]. Przedstawiony wyświetlacz holograficzny wykorzystuje opracowaną technikę binaryzacji, która bazuje na podziale rozkładu intensywności obiektu w płaszczyźnie ostrości na N równych części. Dla każdej z nich tworzony jest składowy obraz przedmiotu, który wykorzystywany jest do generacji N składowych hologramów binarnych. Następnie powstałe ramki wyświetlane są kolejno w sekwencji czasu tworząc pojedynczą rekonstrukcję. Opracowane rozwiązanie zostało opublikowane w artykule [93].

Zasada działania algorytmu zilustrowana jest schematycznie na Rys. 6-8 dla $N = 3$ hologramów składowych. Wyróżnić w nim można cztery podstawowe kroki. W pierwszym wyznaczany jest rozkład intensywności przedmiotu z wykorzystaniem histogramu oraz obliczana jest jego energia całkowita, która jest sumą kwadratu amplitud wszystkich pikseli reprezentujących przedmiot. Dla obiektów 3D rozpatrywana jest ich amplituda w środkowej płaszczyźnie ostrości. W drugim kroku całkowita energia E obiektu dzielona jest na N równych

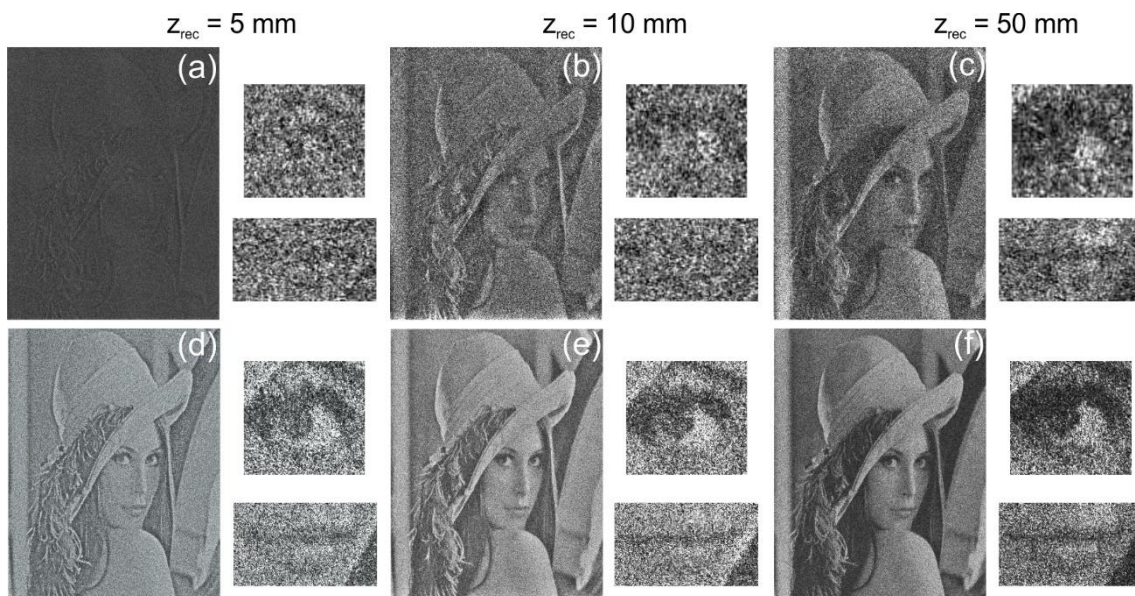
części. Dla każdej z nich generowane są składowe obrazy. Amplitudy komponentów różnią się od siebie. Natomiast wszystkie mają taką samą fazę, odpowiadającą fazie całego przedmiotu. W trzecim kroku generowane są składowe hologramy. Realizowany jest on przez propagację amplitudy zespolonej wiązki obiektowej do płaszczyzny hologramu. Ostatnim krokiem jest binaryzacja każdej ramki osobno z wykorzystaniem metody badania znaku fazy. Gdy jest on ujemny wartości pikseli równe są „0”. Natomiast dla dodatniego znaku piksele mają wartość „1”.



Rys. 6-8. Schemat algorytmu binaryzacji hologramu bazującej na podziale intensywności obiektu na N równych części. Metoda przedstawiona jest dla $N = 3$ ramek.

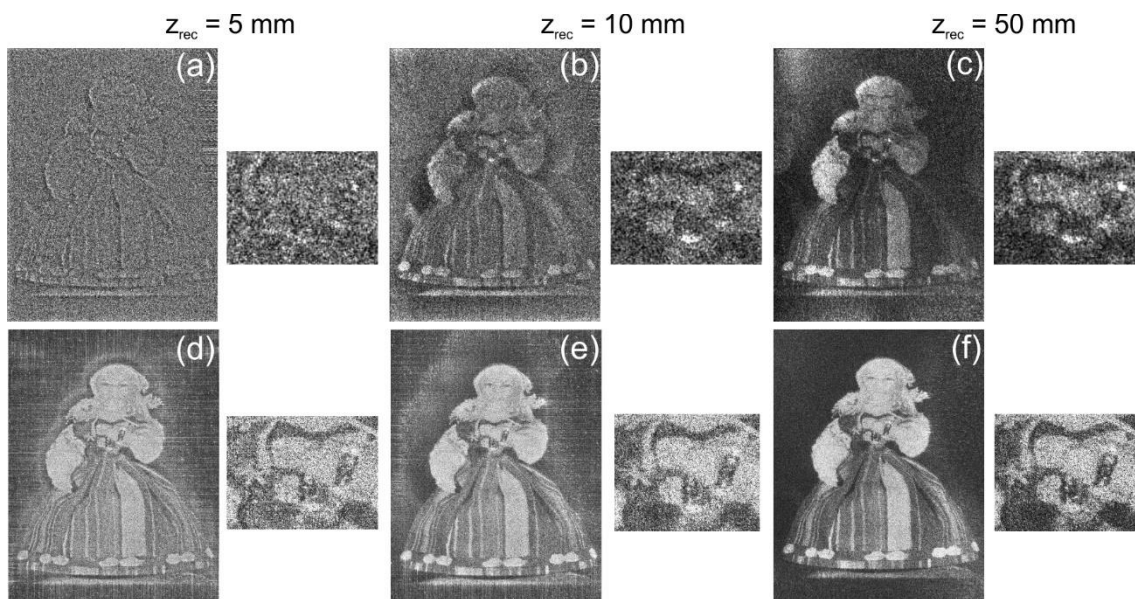
Skuteczność zaproponowanej metody analizowana jest za pomocą symulacji komputerowych. W tym celu generowanych jest $N = 5$ składowych hologramów binarnych tego

samego przedmiotu. Następnie każdy z nich rekonstruowany jest numerycznie z wykorzystaniem propagacji wstecznej do płaszczyzny obiektu. Tak samo jak w przypadku generacji hologramu stosowana jest w tym celu metoda rozkładu na fale płaskie. Powstałe składowe obrazy nakładane są na siebie tworząc pojedynczą rekonstrukcję. Jakość uzyskanych obiektów porównywana jest z jakością otrzymywaną dla standardowej metody binaryzacji z wartością progową [88]. Jako dane wejściowe wykorzystywane są dwa typy obiektów. Pierwszym jest często używane w badaniach metod przetwarzania obrazów zdjęcie „Leny”. Drugim jest rzeczywisty obiekt lalki łowickiej, zarejestrowany w bezsoczewkowym układzie rejestracji Fouriera, którego geometria zilustrowana jest na Rys. 4-1(a). Binarne hologramy generowane i rekonstruowane są dla różnych odległości: 5 mm, 10 mm i 50 mm. Wyniki uzyskane dla obiektu 2D przedstawione są na Rys. 6-9. W celu zademonstrowania różnic pomiędzy porównywanymi algorytmami binaryzacji, na rysunku zamieszczone są powiększone fragmenty obrazu przedstawiające oko i usta kobiety. Uzyskane rezultaty pokazują, że dla binaryzacji z wartością progową obiekty zrekonstruowane na odległości 5 mm mają bardzo niską jakość. Wyższa otrzymywana jest dalej od płaszczyzny hologramu. Natomiast binaryzacja z wykorzystaniem histogramu zapewnia poprawę jakości obrazów dla wszystkich odległości rekonstrukcji. Rezultaty charakteryzuje wysoki poziom szczegółowości oraz obniżony szum plamkowy.



Rys. 6-9. Porównanie numerycznych rekonstrukcji hologramów binarnych wygenerowanych ze zdjęcia „Leny” z użyciem metody binaryzacji (a), (b), (c) z wartością progową oraz (d), (e), (f) z wykorzystaniem opracowanej metody dla różnych odległości rekonstrukcji.

Na Rys. 6-10 przedstawione są wyniki numerycznych rekonstrukcji obiektu 3D w postaci figurki lalki łowickiej, której cechy zamieszczone są w rozdziale 4.4. Podobnie jak w przypadku Rys. 6-9 fragmenty przedmiotu zostały powiększone i zamieszczone na osobnych obrazach. Przedstawiają one bluzkę łowiczanki oraz jej rękę. Uzyskane wyniki udowadniają, że dla obiektów 3D jakość obrazowania jest wyższa z wykorzystaniem opracowanej metody binaryzacji. Wraz ze wzrostem odległości rekonstrukcji coraz więcej szczegółów lalki jest ostro odwzorowana. Dodatkowo rozkład intensywności w odtworzonym obiekcie jest bardziej jednorodny niż w przypadku binaryzacji z wartością progową.

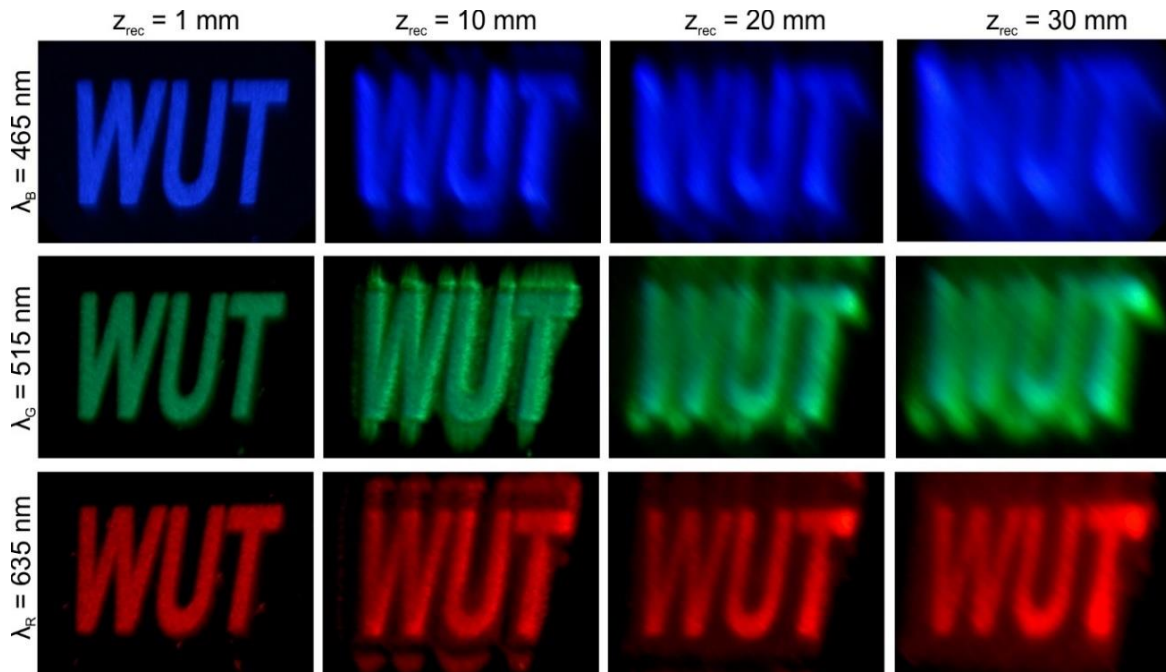


Rys. 6-10. Porównanie numerycznych rekonstrukcji hologramów binarnych, wygenerowanych z hologramu cyfrowego rzeczywistego obiektu (w postaci lalki łowickiej) z wykorzystaniem metody binaryzacji (a), (b), (c) z wartością progową oraz (d), (e), (f) z użyciem opracowanej metody dla różnych odległości rekonstrukcji.

6.4. Optyczne rekonstrukcje obiektów 2D

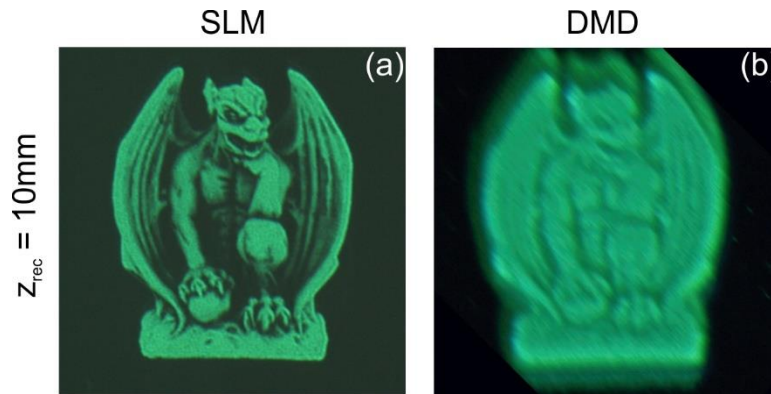
Rozdział ten ilustruje jakość optycznych rekonstrukcji uzyskiwanych w wyświetlaczu holograficznym z modulatorem DMD oraz trzema źródłami światła RGB dla różnych odległości obiektu od płaszczyzny DMD. Budowa układu omówiona jest w rozdziale 6.2. W tym celu generowany jest zbiór hologramów przedmiotu 2D, w postaci białych liter „WUT”, dla centralnych długości fal diod RGB ($\lambda_R = 635 \text{ nm}$, $\lambda_G = 515 \text{ nm}$, $\lambda_B = 465 \text{ nm}$) oraz czterech odległości rekonstrukcji: 1 mm, 10 mm, 20 mm i 30 mm. Następnie panel DMD adresowany jest kolejno przez utworzone dane. Wyniki optycznych rekonstrukcji rejestrowane są na barwnej kamerze CCD, umieszczonej w różnych położeniach wzdłużnych. Uzyskane rezultaty

zamieszczone są na Rys. 6-11. Pokazują one, że rozdzielczość rekonstrukcji holograficznych zależy od odległości od płaszczyzny modulatora DMD. Im jest ona większa, tym bardziej rozmyte są otrzymane obrazy. Największy spadek rozdzielczości otrzymywany jest dla zielonej diody, ze względu na najszerszy zakres spektralny.



Rys. 6-11. Optyczne rekonstrukcje hologramów obiektu 2D w postaci liter „WUT” wygenerowane i zarejestrowane dla różnych barw RGB oraz różnych odległości rekonstrukcji.

Zgodnie z wynikami eksperymentalnymi zamieszczonymi na Rys. 6-11 sformułować można stwierdzenie, że głównym źródłem degradacji jakości otrzymanych obrazów jest dyspersja niekoherentnego oświetlenia na powierzchni modulatora DMD. W celu ilustracji skali spadku jakości obrazowania w zbudowanym wyświetlaczu, która spowodowana jest przez niski stopień koherencji czasowej źródła przeprowadzony jest eksperyment. Porównywane są w nim wyniki otrzymywane w wyświetlaczu z fazowym modulatorem SLM, zbudowanym z ciekłych kryształów (rozdział 3), z rezultatami uzyskiwanymi w układzie z binarnym panelem DMD. W tym celu hologram szaro-odcieniowego zdjęcia gargulca wygenerowany na odległości $z_{rec} = 10\text{ mm}$ jest optycznie rekonstruowany w obu systemach, z wykorzystaniem zielonej diody LED. Zarejestrowane wyniki zamieszczone są na Rys. 6-12. Rekonstrukcję otrzymaną z użyciem modulatora SLM charakteryzuje wysoka jakość. Wszystkie szczegóły obiektu są ostro odwzorowane. Natomiast obraz odtworzony z wykorzystaniem panelu DMD jest rozmyte. Detale przedmiotu są nierozróżnialne. Dodatkowo rekonstrukcja zaburzona jest przez sąsiednie rzędy dyfrakcyjne.



Rys. 6-12. Porównanie optycznych rekonstrukcji przedmiotu w postaci szaro-odcieniowego zdjęcia gargulca uzyskiwanych w układzie wyświetlacza holograficznego z zieloną diodą LED oraz (a) fazowym modulatorem SLM, (b) binarnym panelem DMD.

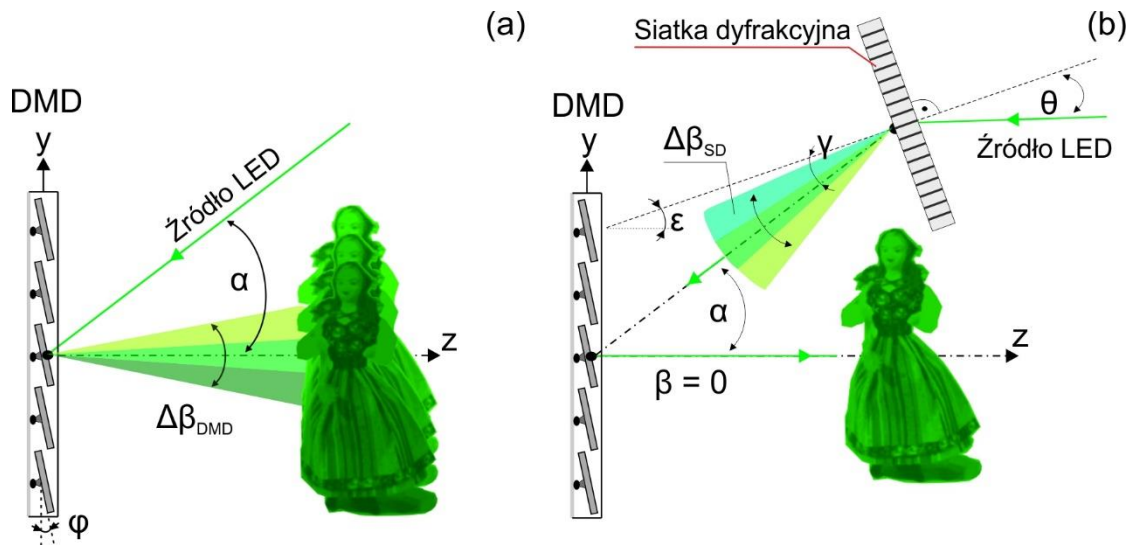
6.5. Koncepcja wyświetlacza holograficznego z korekcją dyspersji modulatora DMD

Jak pokazano na Rys. 6-12 dyspersja niekoherentnego źródła światła wprowadzana przez modulator DMD powoduje dominujący spadek jakości rekonstrukcji. Żeby zapewnić atrakcyjny obraz efekt ten powinien zostać zminimalizowany. W tym rozdziale przedstawione jest opracowane rozwiązanie, które pozwala na korekcję dyspersji modulatora DMD. Zadanie to realizowane jest poprzez wprowadzenie w układzie rekonstrukcji wiązki kompensującej o takiej samej wartości dyspersji co DMD, ale o przeciwnym do niej znaku. Źródłem dyspersji korekcyjnej jest siatka dyfrakcyjna. Dzięki minimalizacji wpływu koherencji czasowej możliwe jest uzyskanie głębi rekonstrukcji porównywalnej do tej, która uzyskiwana jest w systemie wyświetlacza z fazowym modulatorem SLM (rozdziały 3-5).

Rys. 6-13 ilustruje koncepcję korekcji dyspersji modulatora DMD z wykorzystaniem siatki dyfrakcyjnej. Na Rys. 6-13(a) przedstawiony jest schemat powstawania obrazu w układzie rekonstrukcji bez wiązki kompensującej. Panel DMD oświetlony jest przez falę płaską wygenerowaną ze źródła LED. Jak wyjaśniono w rozdziale 6.1 DMD pracuje w wysokim rzędzie dyfrakcyjnym, dlatego długość fali padającej na niego wiązki ma duży wpływ na kąt dyfrakcyjny β_q . W rezultacie, dla niekoherentnego źródła światła, obiekt zakodowany w binarnym hologramie rekonstruowany jest równocześnie przez zbiór wiązek płaskich o różnych kątach dyfrakcyjnych i długościach fal. Wektory falowe tych wiązek zawierają się w kącie $\Delta\beta_{DMD}$, który może być wyznaczony z równania:

$$\Delta\beta_{DMD} = D_{DMD}\Delta\lambda = \frac{q\Delta\lambda}{\cos\beta_q\Delta}, \quad (6-4)$$

gdzie D_{DMD} oznacza dyspersję modulatora, $\Delta\lambda$ zakres spektralny źródła światła, q rząd dyfrakcyjny, β_q kąt dyfrakcyjny, a Δ wymiar piksela modulatora. Dla każdej długości fali, w płaszczyźnie rekonstrukcji, powstają przesunięte poprzecznie względem siebie kopie przedmiotu. Efekt ten prowadzi do rozmycia obrazu. Wyniki eksperymentalne przedstawione na Rys. 6-11 i 6-12 pokazują, że dyspersja powoduje znaczący spadek jakości rekonstruowanych obiektów. Dlatego jej efekt powinien być kompensowany. Analiza korekcji dyspersji opracowanego systemu wyświetlacza znajduje się w rozdziale 6.7.



Rys. 6-13. (a) Schemat powstawania obrazu w wyświetlaczu holograficznym z modulatorem DMD i oświetleniem niekoherentnym, (b) metoda kompensacji dyspersji.

Koncepcja wyświetlacza z korekcją dyspersji przedstawiona jest na Rys. 6-13(b). W zaprezentowanym układzie modulator DMD oświetlony jest wiązką o przeciwnej do niego dyspersji. Jest ona tworzona przez pierwszy rząd siatki dyfrakcyjnej SD, oświetlonej pod kątem θ w kierunku poziomym. Całkowita kompensacja dyspersji możliwa jest, gdy kąt $\Delta\beta_{SD} = D_{SD}\Delta\lambda$ jest równy kątowi $-\Delta\beta_{DMD}$. Wartość D_{SD} zależy od okresu siatki d oraz wartości kąta pierwszego rzędu dyfrakcyjnego γ wyrażonego wzorem:

$$\gamma = \cos^{-1}\left(\frac{\Delta}{dq}\right). \quad (6-5)$$

Wartość γ może być zmieniona przez dobór odpowiedniego kąta oświetlenia siatki w kierunku poziomym:

$$\theta = \sin^{-1}(\lambda d^{-1} - \sin \gamma). \quad (6-6)$$

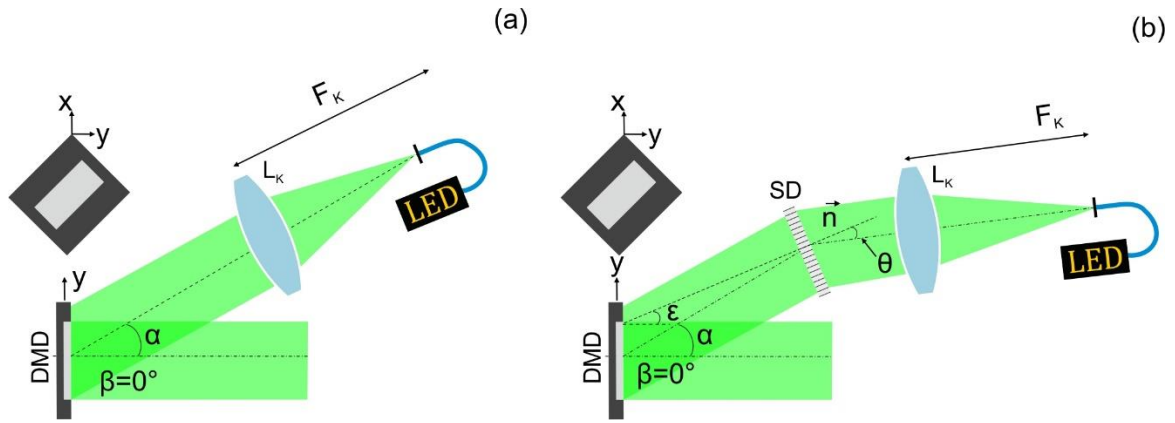
W celu uzyskania prawidłowego kąta oświetlenia DMD, który zapewnia normalny kierunek propagacji wiązki odbitej od jego powierzchni ($\beta = 0^\circ$), należy obrócić siatkę o kąt $\varepsilon = \gamma - \alpha$ wokół osi y .

Dla niekoherentnego źródła światła modulator DMD oświetlony jest przez zbiór fal płaskich o różnych długościach fal oraz kątach padania. Gdy dyspersja siatki równa jest dyspersji modulatora, kąt dyfrakcyjny β_q jest stały. Dzięki temu obrazy zrekonstruowane dla wszystkich długości fal zawartych w źródle światła zajmują tę samą pozycję przestrzenną.

Zgodnie z równaniem (6-4) modulator DMD ma różną wartość dyspersji dla każdego źródła światła RGB. W celu uzyskania całkowitej kompensacji dla wszystkich komponentów należy zastosować trzy siatki dyfrakcyjne o różnych okresach d . W opracowanym wyświetlaczu wykorzystywane jest rozwiązanie z jedną siatką dyfrakcyjną. Umożliwia ono całkowitą korekcję dyspersji modulatora dla zielonej diody LED, która ma największy zakres spektralny.

6.6. Modyfikacja barwnego wyświetlacza holograficznego z panelem DMD i niekoherentnym źródłem światła umożliwiającą korekcję dyspersji modulatora

W rozdziale tym omówiona jest implementacja metody korekcji dyspersji w systemie wyświetlacza holograficznego z DMD, którego schemat zamieszczony jest na Rys. 6-5. Realizowana jest ona przez zastosowanie zmodyfikowanego modułu oświetlającego. Wprowadzone zmiany zaprezentowane są na Rys. 6-13. Rolą układu zilustrowanego na Rys. 6-13(b) jest utworzenie kompensującej wiązki oświetlającej, która ma taką samą wartość dyspersji co DMD, ale przeciwny do niej znak. Jest ona tworzona przez pierwszy rząd siatki dyfrakcyjnej SD (860 linii/mm) oświetlonej przez niekoherentną diodę LED. Soczewka K oraz źródło światła tworzą układ kolimujący, który generuje wiązkę o płaskim czole falowym. Pada ona na siatkę dyfrakcyjną SD pod kątem θ w kierunku poziomym. Kąt θ dobrany jest w taki sposób, żeby uzyskać wymagany kąt pierwszego rzędu dyfrakcyjnego siatki $\gamma = 5,1^\circ$, który zapewnia całkowitą korekcję dyspersji zielonej diody LED. Natomiast prawidłowy kąt oświetlenia modulatora DMD α , zapewniający normalną propagację wiązki odbitej od jego powierzchni, otrzymywany jest przez obrót siatki dyfrakcyjnej o kąt $\varepsilon = 20,3^\circ$. Zastosowanie zmodyfikowanego modułu oświetlającego pozwala na zwiększenie głębi rekonstrukcji wyświetlacza do około 100 mm. Uzyskana wartość objętości porównywalna jest do tej, która otrzymywana jest z wykorzystaniem fazowego modulatora SLM.



Rys. 6-14. Modyfikacja (a) modułu oświetlającego systemu wyświetlacza holograficznego z modulatorem DMD i źródłem LED w (b) moduł zapewniający korekcję dyspersji panelu DMD.

6.7. Analiza korekcji dyspersji trzech barwnych komponentów

W układzie wyświetlacza holograficznego z DMD i oświetleniem niekoherentnym hologram rekonstruowany jest jednocześnie przez zbiór wiązek płaskich o różnych kątach dyfrakcyjnych i długościach fal (rozdział 6.5). Z tego powodu rozdzielczość odtworzonych w nim obrazów jest obniżona przez efekt dyspersji. Spadek jakości spowodowany jest przez geometryczne przesunięcie względem siebie obrazów uzyskiwanych dla różnych długości fal. Efekt ten określony jest jako rozmycie obrazu $\delta_{\Delta\beta_{DMD}}$, które jest liniową funkcją odległości rekonstrukcji z_{rec} . Definiowane jest ono jako:

$$\delta_{\Delta\beta_{DMD}} = z_{rec}\Delta\beta_{DMD}. \quad (6-7)$$

W systemie wyświetlacza, pokazanym na Rys. 6-5, z zieloną diodą LED rozmycie obrazu na odległości 10 mm wynosi 291,7 μm . Porównując tą wartość do wymiaru piksela modulatora jest ona bardzo duża.

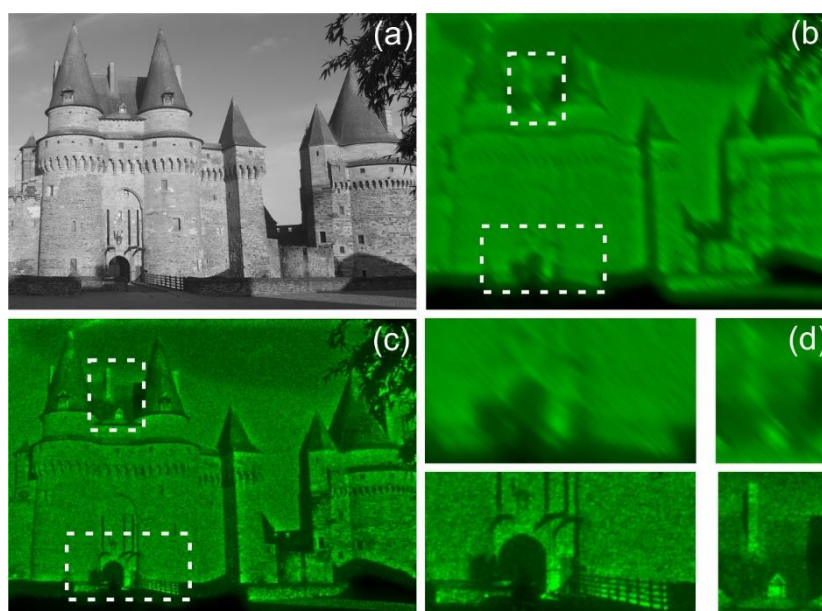
W opracowanym rozwiązaniu korekcja dyspersji realizowana jest z zastosowaniem siatki dyfrakcyjnej umieszczonej w module oświetlającym wyświetlacza (Rys. 6-14). Wprowadza ona dyspersję o wartości równej dyspersji modulatora DMD, ale o przeciwnym do niej znaku. Dyspersja siatki D_{SD} może być kontrolowana przez zmianę jej okresu d oraz kąta pierwszego rzędu dyfrakcyjnego γ . Wartość γ może być zmieniona przez wybór odpowiedniego kąta oświetlenia siatki θ w kierunku poziomym. System wyświetlacza holograficznego wykorzystuje trzy źródła światła. Dla każdego z nich powinny być dobrane odpowiednie parametry siatki dyfrakcyjnej. W opracowanym układzie wykorzystywana jest jedna siatka o okresie $d = 1,205 \mu\text{m}$ (860 linii/mm), która pozwala na uzyskanie całkowitej kompensacji dyspersji modulatora DMD dla zielonej diody LED. Dla innych źródeł korekcja jest częściowa.

Analiza korekcji dyspersji dla źródeł RGB przeprowadzona jest z wykorzystaniem układu współrzędnych zaprezentowanego na Rys. 6-13(b). Zgodnie z równaniem (6-4) dyspersja DMD dla zastosowanych źródeł RGB wynosi kolejno: $D_{DMDR} = 0,648 \text{ rad}/\mu\text{m}$, $D_{DMDG} = 0,833 \text{ rad}/\mu\text{m}$ oraz $D_{DMDB} = 0,926 \text{ rad}/\mu\text{m}$. Jej całkowita kompensacja możliwa jest, gdy $D_{SD} = -D_{DMD}$. W zbudowanym układzie wyświetlacza wykorzystywana jest pojedyncza siatka dyfrakcyjna o stałym okresie d . Jediną zmienną, która może być użyta do kontroli wartości D_{SD} jest wartość kąta pierwszego rzędu dyfrakcyjnego γ siatki. Gdy $\gamma = 5,1^\circ$ w systemie realizowana jest całkowita korekcja dla zielonej diody LED, która ma najszerszy zakres spektralny. Jak wyjaśniono w rozdziale 6.1, uzyskanie normalnego kierunku propagacji wiązki odbitej od modulatora DMD wymaga ustawienia odpowiedniego kąta α . W celu zapewnienia prawidłowych wartości γ i α konieczne jest dostosowanie kąta pochylenia siatki ε oraz kąta jej oświetlenia θ w kierunku poziomym. Dla zielonej barwy $\varepsilon_G = 20,3^\circ$. Kąt ten jest stały dla wszystkich źródeł LED. Żeby zapewnić prawidłowe wartości kątów padania α_R , α_G i α_B na powierzchnię modulatora DMD, wymagane jest ustawienie odpowiednich kątów oświetlenia siatki θ . Wynoszą one kolejno $\theta_R = 31,7^\circ$, $\theta_G = 19,8^\circ$ oraz $\theta_B = 22,7^\circ$. W rezultacie kąty γ_R , γ_G , γ_B są równe odpowiednio 4° , $5,1^\circ$ oraz $2,5^\circ$. Dla powyższych parametrów wartość częściowo skorygowanej dyspersji, oznaczonej indeksem c , wynosi kolejno $D_{CR} = 0,184 \text{ rad}/\mu\text{m}$ oraz $D_{CB} = 0,095 \text{ rad}/\mu\text{m}$ dla źródła czerwonego i niebieskiego. Niepełna korekcja skutkuje powstawaniem rozmycia obrazu, którego wartość w odległości rekonstrukcji $z_{rec} = 10 \text{ mm}$ równa się $\delta_R = 37 \mu\text{m}$ i $\delta_B = 24 \mu\text{m}$.

Właściwości dyspersyjne zaproponowanego systemu przeanalizowane są w dwóch eksperymentach. Pierwszy porównuje jakość obrazowania uzyskiwaną w wyświetlaczu bez kompensacji dyspersji oraz w opracowanym wyświetlaczu z całkowitą korekcją dyspersji. Drugi eksperyment porównuje rozmycie obrazu otrzymywane dla składowych barw RGB na różnej odległości rekonstrukcji. Dodatkowo ilustruje on możliwość odtworzenia barwy przedmiotu oraz pokazuje, że wysoka jakość obrazowania zachowana jest na dużej głębi. Oba eksperymenty kładą nacisk na wysokorozdzielcze obrazowanie. Dlatego realizowane są z wykorzystaniem metody multipleksingu czasowego, w której wiele ramek tworzy pojedynczą rekonstrukcję.

W celu porównania układu bez korekcji dyspersji (rozdział 6.2) z opracowanym systemem, ten sam hologram jest optycznie rekonstruowany w obu wyświetlaczach z użyciem zielonej diody LED. Jest on generowany ze zdjęcia przedstawiającego zamek dla $\lambda_G = 515 \text{ nm}$. Dla systemu, zbudowanego z powiększeniem 1:1 i przestrzennie niekoherentnym źródłem światła

o wymiarze $960 \mu\text{m}$, głębia rekonstrukcji ograniczona jest do około $\pm 50 \text{ mm}$ [57]. Najwyższą rozdzielczość uzyskuje się dla przedmiotów umieszczonych blisko płaszczyzny kopii modulatora. Z tego powodu hologram wygenerowany i rekonstruowany jest dla $z_{rec} = 10 \text{ mm}$. Rys. 6-15 demonstruje otrzymane wyniki, które zarejestrowane są bezpośrednio na matrycy kamery CCD. Na Rys. 6-15(a) zamieszczone jest zdjęcie wykorzystane jako obiekt testowy. Rys. 6-15(b) przedstawia optyczną rekonstrukcję uzyskaną w wyświetlaczu bez kompensacji dyspersji, natomiast 6-15(c) w systemie z całkowitą korekcją dyspersji. Rozpatrywany przedmiot ma wiele drobnych szczegółów. Dla dokładniejszego porównania jakości uzyskiwanej w rozpatrywanych układach, dwa dodatkowe fragmenty (oznaczone przerywanymi prostokątami) zarejestrowanych wyników są powiększone i przedstawione na Rys. 6-15(d).

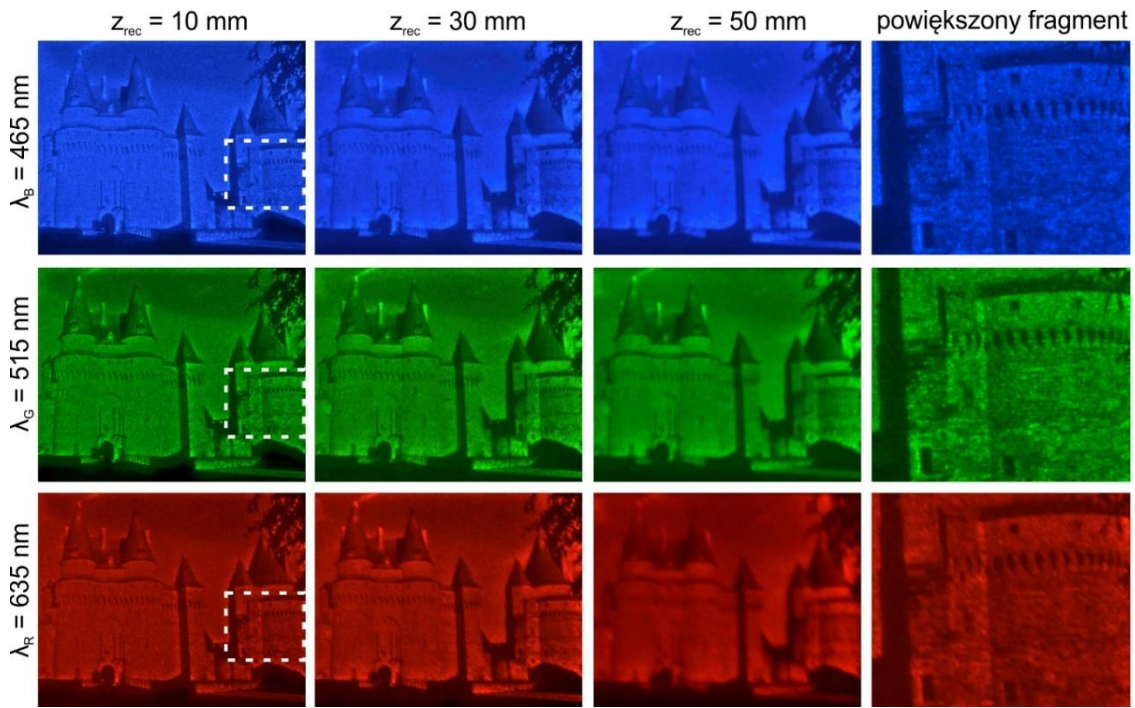


Rys. 6-15. Optyczne rekonstrukcje (a) zdjęcia zamku otrzymane w systemie wyświetlacza holograficznego z modulatorem typu DMD i zieloną diodą LED (b) bez korekcji dyspersji i (c) z całkowitą korekcją dyspersji; (d) powiększone fragmenty obrazów.

Rezultaty otrzymane w wyświetlaczu bez korekcji dyspersji charakteryzuje niska jakość. Nawet dla niewielkiej odległości rekonstrukcji odtworzony obraz jest rozmyty, a szczegóły zamku są prawie nierozróżnialne. Natomiast system z kompensacją dyspersji umożliwia uzyskanie wysokiej jakości rekonstrukcji. Wszystkie szczegóły obiektu są dobrze widoczne. Dostrzec można nawet barierki na moście zwodzonym oraz okno w wieży zamku.

W kolejnym eksperymencie generowany jest zbiór hologramów przedmiotu, pokazanego na Rys. 6-15(a), dla trzech długości fal RGB ($\lambda_R = 635 \text{ nm}$, $\lambda_G = 515 \text{ nm}$, $\lambda_B = 465 \text{ nm}$) oraz trzech

odległości: 10 mm, 30 mm i 50 mm. Następnie hologramy są optycznie rekonstruowane z wykorzystaniem trzech diod RGB. Każde ze źródeł oświetla siatkę dyfrakcyjną pod innym kątem θ . Obrazy zarejestrowane przez kamerę CCD, umieszczoną w różnych położeniach wzdluznych, przedstawione są na Rys. 6-16.



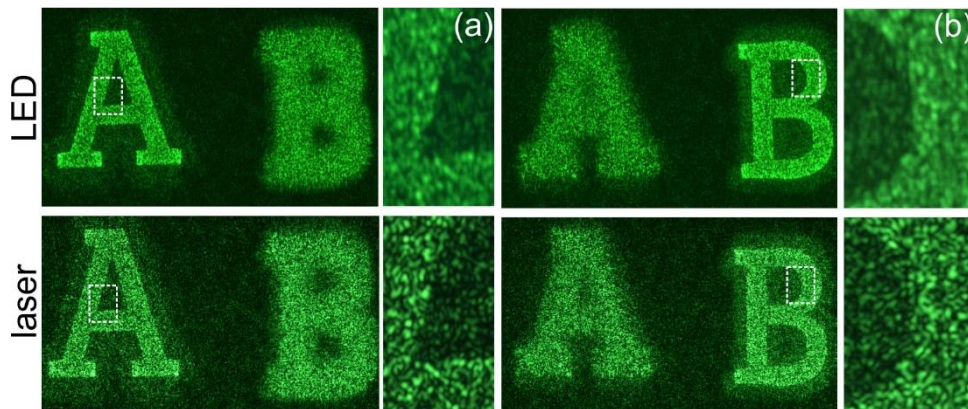
Rys. 6-16. Optyczne rekonstrukcje zdjęcia zamku uzyskane dla trzech źródeł RGB w różnych odległościach rekonstrukcji.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że zaproponowany system wyświetlacza umożliwia odtworzenie barwnych przedmiotów oraz zapewnia wysoką jakość obrazowania na dużej głębi. Otrzymana przestrzeń rekonstrukcji jest porównywalna do tej, która uzyskiwana jest dla wyświetlacza z modulatorem SLM (rozdział 3). Powiększone fragmenty obrazów, zarejestrowanych dla $z_{rec} = 10$ mm, pokazują rozmycie obrazu, które jest miarą spadku jakości obrazowania spowodowanego dyspersją. Dla zielonej barwy jest ono niedostrzegalne. Wszystkie szczegóły są ostro odwzorowane. Dla niebieskiej barwy kontury cegieł na ścianie zamku przestają być rozróżnialne, natomiast dla czerwonej rozmycie obrazu jest widoczne.

6.8. Redukcja szumu plamkowego z zastosowaniem niekoherentnego źródła światła

Rozdział ten demonstruje poziom redukcji szumu plamkowego wyświetlacza z modulatorem DMD, który otrzymywany jest z zastosowaniem niekoherentnego oświetlenia. W tym celu porównywane są ze sobą wyniki optycznych rekonstrukcji uzyskane

w opracowanym systemie z wykorzystaniem lasera ($\lambda = 532 \text{ nm}$) oraz zielonej diody LED ($\lambda = 515 \text{ nm}$), dla której otrzymywana jest całkowita korekcja dyspersji panelu DMD. W przeprowadzonym eksperymencie generowany jest hologram obiektu 3D, który utworzony jest z białych liter „AB” umieszczonych w odległościach kolejno -10 mm i 10 mm . Kładzie on nacisk na ilustrację redukcji szumu, która uzyskiwana jest dla pojedynczej ramki. Z tego powodu nie jest w nim wykorzystywana metoda multipleksingu czasowego. Utworzony hologram jest optycznie rekonstruowany z wykorzystaniem rozpatrywanych źródeł. Rys. 6-17 przedstawia obrazy zarejestrowane dla dwóch pozycji zogniskowania. Na Rys. 6-17(a) litera „A” jest ostro odwzorowana, a na Rys. 6-17(b) litera „B”. Dla obu wyników zademonstrowane są powiększone fragmenty obrazów ilustrujące ich krawędzie.



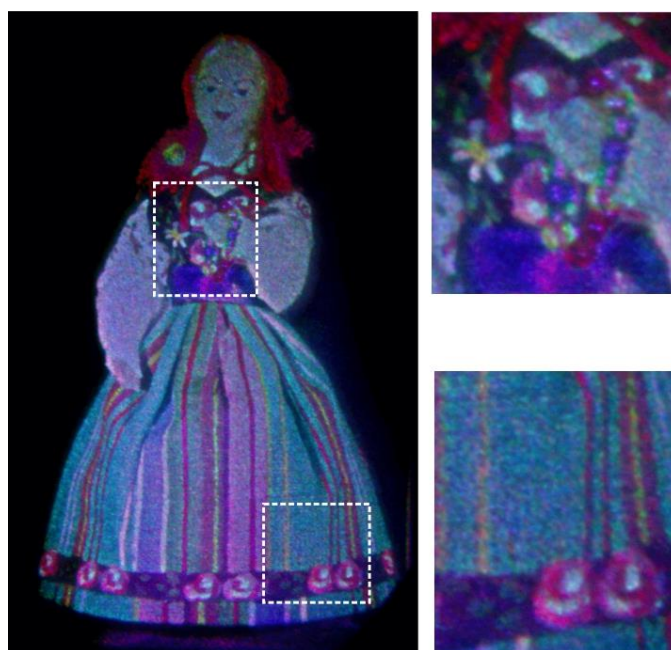
Rys. 6-17. Porównanie optycznych rekonstrukcji obiektu 3D uzyskanych w wyświetlaczu holograficznym z korekcją dyspersji i wykorzystaniem niekoherentnego źródła światła LED z wynikami otrzymanymi dla koherentnego źródła laserowego. Płaszczyzna ostrości kamery umieszczona jest na (a) literze „A”, (b) literze „B”.

Otrzymane wyniki pokazują zalety stosowania niekoherentnego źródła światła w wyświetlaczu holograficznym z modulatorem DMD. Oświetlenie LED pozwala na efektywną redukcję koherentnego szumu plamkowego obecnego wewnątrz obiektu, jak i w jego okolicy. Amplituda obrazu zrekonstruowana z jego użyciem jest bardziej jednorodna. Dodatkowo krawędzie liter są ostrzej odwzorowane. Przeprowadzony eksperyment pozwala wysunąć wniosek, że zastosowanie diody LED umożliwia znaczące podniesienie jakości obrazowania dla pojedynczej ramki.

6.9. Optyczne rekonstrukcje rzeczywistego obiektu 3D

Rozdział ten bada możliwość uzyskania wysokiej jakości barwnych rekonstrukcji obiektów rzeczywistych w skali 1:1 z zastosowaniem modulatora DMD oraz niekoherentnego źródła

LED. W tym celu zbudowany jest układ wyświetlacza, który wykorzystuje moduł oświetlający przedstawiony na Rys 6-13(b) oraz moduł obrazujący zilustrowany na Rys. 4-2. Pierwszy z nich zapewnia korekcję dyspersji modulatora DMD. Drugi tworzy powiększoną kopię przedmiotu ($m = -6$), który może być obserwowany gołym okiem umieszczonym w oknie obserwacji. Danymi wyświetlanymi na DMD jest hologram binarny rzeczywistego obiektu 3D. Jest on generowany z hologramu cyfrowego lalki łowickiej z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 6.3. Cechy przedmiotu zamieszczone są w rozdziale 4.4. Celem eksperymentu jest uzyskanie jak najwyższej jakości obrazowania. Z tego powodu realizowany jest z wykorzystaniem metody multipleksingu czasowego, w którym wiele składowych hologramów tworzy pojedynczy obraz. Barwa przedmiotu rekonstruowana jest z użyciem trzech diod RGB. Na modulatorze SLM wyświetlane są w sekwencji czasu składowe hologramy RGB (wygenerowane dla centralnych długości fal użytych źródeł). Wyniki optycznych rekonstrukcji zamieszczone są na Rys. 6-18. Na osobnych obrazach pokazane są dwa powiększone fragmenty odtworzonego przedmiotu, które zaznaczone przerywanymi prostokątami. Otrzymane rezultaty charakteryzuje bardzo wysoka jakość. Wszystkie detale przedmiotu są ostro odwzorowane. Barwa obiektu jest prawidłowo odtworzona. Porównując uzyskane wyniki z tymi, które otrzymywane są dla fazowego modulatora SLM można uznać, że poziom szczegółowości jest na nich podobny.



Rys. 6-18. Optyczna rekonstrukcja lalki łowickiej uzyskana z wykorzystaniem modulatora DMD oraz metody multipleksingu czasowego.

6.10. Podsumowanie

Zademonstrowany w tym rozdziale barwny wyświetlacz holograficzny pozwala na rekonstrukcję wysokiej jakości dużych przedmiotów 2D i 3D z wykorzystaniem binarnego modulatora DMD oraz diod RGB. Atrakcyjny obraz otrzymywany jest dzięki zastosowaniu opracowanej metody korekcji dyspersji panelu DMD. Polega ona na wprowadzeniu w układzie rekonstrukcji wiązki kompensującej o takiej samej wartości dyspersji co DMD, ale o przeciwnym do niej znaku. Źródłem dyspersji korekcyjnej jest siatka dyfrakcyjna. Dzięki minimalizacji wpływu koherencji czasowej na jakość rekonstrukcji możliwe jest uzyskanie głębi porównywalnej do tej, która otrzymywana jest w systemie wyświetlacza z fazowym modulatorem SLM.

W zaproponowanym rozwiązaniu binarne hologramy generowane są z wykorzystaniem opracowanego algorytmu binaryzacji, który bazuje na podziale rozkładu intensywności obiektu w płaszczyźnie ostrości na N równych części. Dla każdej z nich tworzony jest składowy obraz przedmiotu, który stosowany jest do generacji N składowych hologramów binarnych. Następnie powstałe ramki wyświetlane są kolejno w sekwencji czasu tworząc pojedynczą rekonstrukcję. Przeprowadzone w rozdziale symulacje dowodzą, że zaproponowana metoda umożliwia uzyskanie wysokiego poziomu szczegółowości odtworzonych obrazów. Dodatkowo charakteryzuje je obniżony szum plamkowy oraz jednorodny rozkład intensywności.

7. Podsumowanie rozprawy i kierunki dalszych prac

7.1. Podsumowanie rozprawy

W niniejszej rozprawie podjęto się zadania opracowania i budowy systemu barwnego wyświetlacza holograficznego z oświetleniem niekoherentnym, który zapewnia atrakcyjną rekonstrukcję przedmiotu trójwymiarowego oraz umożliwia jego obserwację gołym okiem w zwiększonym kącie pola widzenia. Po przeanalizowaniu cech i ograniczeń rozwiązań opisanych w literaturze zaproponowane zostały nowe algorytmy i konstrukcje wyświetlacza, które pozwalają na zastosowanie niekoherentnego źródła światła.

Opracowany system wyświetlacza zapewnia odtworzenie zespolonej amplitudy obiektu z wykorzystaniem schematu kodowania zespolonego ze zlinearyzowaną odpowiedzią amplitudową. Metoda umożliwia uzyskanie konfiguracji systemu, w której objętość rekonstrukcji zlokalizowana jest wokół płaszczyzny modulatora SLM. Tylko taka konstrukcja układu umożliwia uzyskanie obrazów o wysokiej rozdzielczości dla oświetlenia niekoherentnego.

W systemie rekonstrukcja barwy realizowana może być z użyciem opracowanej metody multipleksingu częstotliwościowego lub standardowej techniki multipleksingu czasowego. W pierwszym rozwiązaniu trzy barwne składowe hologramy RGB kodowane są w zespolonym hologramie światła białego. Dekodowanie barwy odbywa się z zastosowaniem białej diody LED oraz specjalnie zaprojektowanej maski barwnej umieszczonej w płaszczyźnie Fouriera wyświetlacza. Metoda zapewnia pełne wykorzystanie częstotliwości fazowego modulatora SLM. Odtworzone obrazy charakteryzuje trzykrotnie zmniejszona rozdzielczość w kierunku pionowym. Technika multipleksingu czasowego zapewnia wyższą jakość rekonstrukcji kosztem obniżonej częstotliwości odświeżania obrazu.

Opracowany wyświetlacz pozwala na uzyskanie atrakcyjnego obrazu dużego przedmiotu 3D, który może być obserwowany gołym okiem. Dzięki zastosowaniu systemu z oknem obserwacji, który zmodyfikowany jest o nową ścieżkę przetwarzania, mogą być w nim rekonstruowane zarówno hologramy generowane komputerowo jak i hologramy cyfrowe obiektów rzeczywistych. Dodatkową zaletą zaproponowanego rozwiązania jest możliwość manipulacji geometrycznych odtworzonych obrazów. Mogą one być zrekonstruowane na dowolnej odległości od modulatora, przesunięte poprzecznie, jak również powiększone.

Zrekonstruowany przedmiot 3D może być obserwowany w rozszerzonym kącie pola widzenia, gdy system z oknem obserwacji przekształcony jest w układ tęczowego wyświetlacza

holograficznego. W opracowanym rozwiązaniu wymagany efekt tęczy wprowadzany jest przez moduł oświetlający. Zbudowany jest on z zastosowaniem wysokoczęstotliwościowej siatki dyfrakcyjnej oświetlonej przez źródło światła białego. Pomimo, że system nie rekonstruuje rzeczywistej barwy przedmiotu zapewnia on atrakcyjne obrazy. Ich barwa zmienia się wraz z położeniem oka użytkownika.

W podjętej rozprawie udowodniono, że w zaproponowanym systemie możliwe jest uzyskanie wysokiej jakości rekonstrukcji z zastosowaniem zarówno fazowych, jak i binarnych przestrzennych modulatorów światła. Dla drugiego typu urządzeń opracowano metodę korekcji dyspersji niekoherentnego źródła światła generowaną przez panel DMD. W przedstawionej metodzie kompensacja realizowana jest z zastosowaniem siatki dyfrakcyjnej umieszczonej w module oświetlającym wyświetlacza. Wprowadza ona dyspersję o wartości równej dyspersji modulatora DMD, ale o przeciwnym znaku. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe jest uzyskanie głębi rekonstrukcji porównywalnej do tej, która osiągnana jest z zastosowaniem fazowego modulatora SLM.

7.2. Elementy nowości w rozprawie oraz kierunki dalszych prac

W pracy można wyróżnić szereg nowości, które dotyczą obszarów:

- koncepcyjno-numerycznych,
- instrumentalno-eksperymentalnych,

W obszarze koncepcyjno-numerycznym opracowano:

- algorytm generacji zespolonego hologramu światła białego, który umożliwia rekonstrukcję barwnego obiektu 3D z pojedynczego hologramu wyświetlanego na fazowym modulatorze SLM (publikacja w czasopiśmie Optics Express [57]);
- numeryczną ścieżkę przetwarzania holograficznego z układu rejestracji do układu rekonstrukcji dla wiązek z usuniętym członem sferycznym, która umożliwia odtworzenie rzeczywistego przedmiotu w dowolnym położeniu oraz z dowolnym powiększeniem (publikacja w czasopiśmie Optics Express [63]);
- algorytm generacji hologramu tęczowego, który rekonstruowany jest w układzie wyświetlacza holograficznego z tęczowym oknem obserwacji (publikacja w czasopiśmie Optics Express [77]);
- algorytm binaryzacji zespolonego hologramu bazującego na histogramie oraz multipleksingu czasowym (publikacja konferencyjna [93]);

- metodę analizy wpływu koherencji przestrzennej źródła światła na rozdzielczość rekonstruowanych przedmiotów w układzie wyświetlacza holograficznego z oknem obserwacji [63];
- metodę analizy wymiarów tęczowego okna obserwacji (publikacja w czasopiśmie ETRI Journal [79]);
- metodę analizy właściwości spektralnych obiektów obserwowanych w układzie tęczowego wyświetlacza holograficznego [77];
- metodę analizy wpływu wymiaru szczeliny nakładanej na hologram tęczowy na rozdzielczość obrazowania [77];
- metodę korekcji dyspersji binarnego modulatora DMD oświetlonego niekoherentnym źródłem światła (planowana publikacja w czasopiśmie Optics Letters).

W zakresie instrumentalno-eksperymentalnym najważniejszymi elementami nowości są:

- budowa układu barwnego wyświetlacza holograficznego z fazowym modulatorem SLM, diodą światła białego oraz maską barwną, wraz z opracowaniem i implementacją procedury kalibracji [57];
- budowa układu tęczowego wyświetlacza holograficznego z fazowym modulatorem SLM oraz zewnętrznym źródłem dyspersji, który umożliwi rekonstrukcję w zwiększonym kącie pola widzenia [77];
- implementacja metody korekcji dyspersji niekoherentnego źródła światła wprowadzonej przez modulator DMD;
- opracowanie i implementacja metod kalibracyjnych.

Prace badawcze nad tematyką budowy systemu barwnego wyświetlacza holograficznego o szerokim kącie pola widzenia i oświetleniem niekoherentnym stanowią ważną część badań, które powinny zostać podjęte w celu zbudowania urządzenia dostępnego w powszechnym użytku oraz mogącego konkurować z innymi wyświetlaczami 3D. W celu wdrożenia opracowanego układu należy:

- zbudować system umożliwiający dwuoczną obserwację;
- zaprojektować kompaktowy system wyświetlacza, który mógłby być zaimplementowany w goglach do rzeczywistości wirtualnej i rozszerzonej;
- wprowadzić interakcję między użytkownikiem, a wyświetlanymi obrazami.

Bibliografia

- [1] P. Hariharan, *Optical Holography: Principle Techniques and Applications*, (Cambridge Univ. Press, 1984).
- [2] Y. Pan, J. Liu, X. Li, Y. Wang, „A Review of Dynamic Holographic Three-Dimensional Display: Algorithms, Devices, and Systems”, *Proceedings of IEEE Conference on Transactions on Industrial Informatics*, 1599-1610 (2016).
- [3] P. Memmolo, V. Bianco, M. Paturzo, B. Javidi, P. Netti, P. Ferraro, „Encoding multiple holograms for speckle-noise reduction in optical display”, *Opt. Express* 22, 25768-25775 (2014).
- [4] D. Kelly, D. Monaghan, N. Pandey, T. Kozacki, A. Michałkiewicz, G. Finke, B. Hennelly, M. Kujawinska, „Digital holographic capture and optoelectronic reconstruction for 3-D displays”, *Int. J. Digit. Multimed. Broadcast*. 2010, 759329 (2010).
- [5] R. Kelner, J. Rosen, „Spatially incoherent single channel digital Fourier holography”, *Opt. Lett.* 37, 3723-3725 (2012).
- [6] J. Chen, D. Chu, „Improved layer-based method for rapid hologram generation and real-time interactive holographic display applications”, *Opt. Express* 23, 18143-18155 (2015).
- [7] A. Symeonidou, D. Blinder, A. Munteanu, P. Schelkens, „Computer-generated holograms by multiple wavefront recording plane method with occlusion culling”, *Opt. Express* 23, 22149-22161 (2015).
- [8] H. Kang, E. Stoykova, H. Yoshikawa, „Fast phase-added stereogram algorithm for generation of photorealistic 3D content,” *Appl. Opt.* 55, A135-A143 (2016).
- [9] M. Kujawinska, T. Kozacki, C. Falldorf, T. Meeser, B. Hennelly, P. Garbat, W. Zaperty, M. Niemelä, G. Finke, M. Kowiel, T. Naughton, „Multiwavefront digital holographic television”, *Opt. Express* 22, 2324-2336 (2014).
- [10] P. Makowski, T. Kozacki, P. Zdankowski, W. Zaperty, „Synthetic aperture Fourier holography for wide-angle holographic display of real scenes”, *Appl. Opt.* 54, 3658-3665 (2015).
- [11] Z. Wang, G. Lv, Q. Feng, A. Wang, H. Ming, „Simple and fast calculation algorithm for computer-generated hologram based on integral imaging using look-up table”, *Opt. Express* 26, 13322-13330 (2018).
- [12] H. Sato, T. Kakue, Y. Ichihashi, Y. Endo, K. Wakunami, R. Oi, K. Yamamoto, H. Nakayama, T. Shimobaba, T. Ito, „Real-time colour hologram generation based on ray-sampling plane with multi-GPU acceleration”, *Sci. Rep.* 8, 1500 (2018).
- [13] Y. Wang, X. Sang, Z. Chen, H. Li, L. Zhao, „Real-time photorealistic computer-generated holograms based on backward ray tracing and wavefront recording planes”, *Opt. Commun.* 429, 12-17 (2018).
- [14] M. Sutkowski, M. Kujawińska, „Application of Liquid Crystal Devices for optoelectronics reconstruction of digitally stored holograms”, *Opt. Lasers Eng.*,
- [15] G. Lazarev, A. Hermerschmidt, S. Krueger, S. Osten, *LCOS Spatial light modulators: trends & applications*, rozdział w *Advances in optical imaging and metrology*, pod red. W. Osten, N. Reingand, (Wiley&Sons, 2012).
- [16] Thomas Kreis, P. Aswendt, R. Hofling, „Hologram reconstruction using a digital micromirror device”, *Opt. Eng.* 40, 926-933 (2001).
- [17] G. Finke, „Development and Investigation of Wide Angle Holographic Display Based on Multi Spatial Light Modulators”, praca doktorska (2016).

- [18] F. Yaraş, H. Kan, L. Onural, „Real-time phase-only color holographic video display system using LED illumination”, *Appl. Opt.* 48, H48–53 (2009).
- [19] K. Takano, K. Sato, „Color electro-holographic display using a single white light source and a focal adjustment method”, *Opt. Eng.* 41, 2427 (2002).
- [20] A. Shiraki, N. Takada, M. Niwa, Y. Ichihashi, T. Shimobaba, N. Masuda, T. Ito, „Simplified electroholographic color reconstruction system using graphics processing unit and liquid crystal display projector”, *Opt. Express* 17, 16038–16045 (2009).
- [21] J. Jia, Y. Wang, J. Liu, X. Li, Y. Pan, Z. Sun, B. Zhang, Q. Zhao, W. Jiang, „Reducing the memory usage for effective computer-generated hologram calculation using compressed look-up table in full-color holographic display”, *Appl. Opt.* 52, 1404–1412 (2013).
- [22] H. Araki, N. Takada, H. Niwase, S. Ikawa, M. Fujiwara, H. Nakayama, T. Kakue, T. Shimobaba, T. Ito, „Real-time time-division color electroholography using a single GPU and a USB module for synchronizing reference light”, *Appl. Opt.* 54, 10029–10034 (2015).
- [23] T. Shimobaba, T. Ito, „A color holographic reconstruction system by time division multiplexing with reference lights of laser”, *Opt. Rev.* 10, 339–341 (2003).
- [24] T. Shimobaba, A. Shiraki, Y. Ichihashi, N. Masuda, T. Ito, „Interactive color electroholography using the FPGA technology and time division switching method”, *IEICE Electronics Express* 5, 271–277 (2008).
- [25] K. Sato, A. Sugita, M. Morimoto, K. Fujii, „Reconstruction of color images of high quality by a holographic display”, *Proc. SPIE* 6136, 61360V (2006).
- [26] T. Senoh, T. Mishina, K. Yamamoto, R. Oi, T. Kurita, „Viewing-zone-angle-expanded color electronic holography system using ultra-high-definition liquid crystal displays with undesirable light elimination”, *J. Disp. Technol.* 7, 382–390 (2011).
- [27] T. Ito, K. Okano, „Color electroholography by three colored reference lights simultaneously incident upon one hologram panel”, *Opt. Express* 12, 4320–4325 (2004).
- [28] T. Shimobaba, T. Takahashi, N. Masuda, T. Ito, „Numerical study of color holographic projection using space-division method”, *Opt. Express* 19, 10287–10292 (2011).
- [29] M. Makowski, I. Ducin, M. Sypek, A. Siemion, A. Siemion, J. Suszek, A. Kołodziejczyk, „Color image projection based on Fourier holograms”, *Opt. Letters* 35, 1227 – 1229 (2010).
- [30] M. Makowski, I. Ducin, K. Kakarenko, J. Suszek, M. Sypek, A. Kołodziejczyk, „Simple holographic projection in color”, *Opt. Express* 20, 25130 (2012).
- [31] A. Jesacher, S. Bernet, M. Ritsch-Marte, „Colour hologram projection with an SLM by exploiting its full phase modulation range”, *Opt. Express* 22, 20530–20541 (2014).
- [32] C. Hwang, Y. Kim, J. Yang, J. Choi, J. Pi, G. Kim, C. Hwang, K. Choi, H. Kim, W. Lee, S. Park, J. Kim, „Invited Paper: Ultimate Resolution Active Matrix Display with Oxide TFT Backplanes for Electronic Holographic Display”, *SID Symposium Digest of Technical Papers* 49, 610–612 (2018).
- [33] J. Son, B. Lee, O. Chernyshov, K. Moon, H. Lee, „Holographic display based on a spatial DMD array”, *Opt. Lett.* 38, 3173–3176 (2013).
- [34] H. Sasaki, K. Yamamoto, K. Wakunami, Y. Ichihashi, R. Oi, T. Senoh, „Large size three-dimensional video by electronic holography using multiple spatial light modulators”, *Sci. Rep.* 4, 6177 (2014).
- [35] J. Hahn, H. Kim, Y. Lim, G. Park, B. Lee, „Wide viewing angle dynamic holographic stereogram with a curved array of spatial light modulators”, *Opt. Express* 16, 12372–12386 (2008).

- [36] F. Yaraş, H. Kang, L. Onural, „Circular holographic video display system”, *Opt. Express* 19, 9147-9156 (2011).
- [37] T. Kozacki, M. Kujawinska, G. Finke, B. Hennelly, N. Pandey, „Extended viewing angle holographic display system with tilted SLMs in a circular configuration”, *Appl. Opt.* 51, 1771-1780 (2012).
- [38] W. Zaperty, T. Kozacki, M. Kujawińska, „Multi-SLM color holographic 3D display based on RGB spatial filter”, *J. Disp. Technol.* 12, 1724–1731 (2016).
- [39] Y. Takaki, K. Fujii, „Viewing-zone scanning holographic display using a MEMS spatial light modulator”, *Opt. Express* 22, 24713-24721 (2014).
- [40] J. Li, Q. Smithwick, D. Chu, „Full bandwidth dynamic coarse integral holographic displays with large field of view using a large resonant scanner and a galvanometer scanner”, *Opt. Express* 26, 17459-17476 (2018).
- [41] Y. Sando, D. Barada, T. Yatagai, „Full-color holographic 3D display with horizontal full viewing zone by spatiotemporal-division multiplexing”, *Appl. Opt.* 57, 7622-7626 (2018).
- [42] Y. Lim, K. Hong, H. Kim, H. Kim, E. Chang, S. Lee, T. Kim, J. Nam, H. Choo, J. Kim, J. Hahn, „360-degree tabletop electronic holographic display”, *Opt. Express* 24, 24999-25009 (2016).
- [43] T. Kozacki, G. Finke, P. Garbat, W. Zaperty, M. Kujawińska, „Wide angle holographic display system with spatiotemporal multiplexing”, *Opt. Express* 20, 27473-27481 (2012).
- [44] R. Häussler, A. Schwerdtner, N. Leister, „Large holographic displays as an alternative to stereoscopic displays”, *Proc. SPIE* 6803, 68030M (2008).
- [45] S. Reichelt, R. Häussler, N. Leister, G. Fütterer, H. Stolle, A. Schwerdtner, *Holographic 3-D displays electro-holography within the grasp of commercialization*, rozdział w *Book of Advances in Lasers and Electro Optics*, pod. red. N. Costa, A. Cartaxo, (Academic, 2010).
- [46] H. Choo, M. Park, H. Kim, C. Bae, B. G. Chae, H. Kim, K. Moon, J. Kim, „Real-time pupil tracking backlight system for holographic 3D display”, *Chinese Opt. Lett.* 12, 10–13 (2014).
- [47] D. Wang, Q. Wang, J. Wang, X. Zhoun, D. Li, „Color holographic display method based on single – spatial light modulator”, *Opt. Eng.* 53, 073107 (2014).
- [48] T. Kozacki, R. Józwicki, „Image reconstruction in near field digital holography with partially coherent illumination”, *Opt. Commun.* 252, 188-201 (2005).
- [49] K. Nugent, „Partially coherent diffraction patterns and coherence measurement”, *JOSA A* 8, 1574-1579 (1991).
- [50] Y. Deng, D. Chu, „Coherence properties of different light sources and their effect on the image sharpness and speckle of holographic displays”, *Sci. Rep.* 7, 5893 (2017).
- [51] E. Moon, M. Kim, J. Roh, H. Kim, J. Hahn, „Holographic head-mounted display with RGB light emitting diode light source”, *Opt. Express* 22, 6526 (2014).
- [52] L. G. Neto, D. Roberge, Y. Sheng, „Full-range, continuous, complex modulation by the use of two coupled mode liquid-crystal televisions”, *Appl. Opt.* 35, 4567–4576 (1996).
- [53] P. Birch, R. Young, D. Budgett, C. Chatwin, „Two-pixel computer-generated hologram with a zero-twist nematic liquid-crystal spatial light modulator”, *Opt. Lett.* 25, 1013-1015 (2000).
- [54] S. Reichelt, R. Häussler, G. Fütterer, N. Leister, H. Kato, N. Usukura, Y. Kanbayashi, „Full-range, complex spatial light modulator for real-time holography”, *Opt. Lett.* 37, 1955-1957 (2012).

- [55] H. Song, G. Sung, S. Choi, K. Won, H. Lee, H. Kim, „Optimal synthesis of double-phase computer generated holograms using a phase-only spatial light modulator with grating filter”, *Opt. Express* 20, 29844-29853 (2012).
- [56] X. Li, J. Liu, J. Jia, Y. Pan, Y. Wang, „3D dynamic holographic display by modulating complex amplitude experimentally”, *Opt. Express* 21, 20577-20587 (2013).
- [57] T. Kozacki, M. Chlipała, „Color holographic display with white light LED source and single phase only SLM,” *Opt. Express* 24, 2189–2199 (2016).
- [58] Thorlabs Inc., https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3482&p-n=CCS200/M.
- [59] M. Kujawińska, R. Porras-Aguilar, W. Zaperty, „LCoS spatial light modulators as active phase elements of full-field measurement systems and sensors”, *Metrology and Measurement Systems* 19, 445–458 (2012).
- [60] J. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, (McGraw-Hill, 1996).
- [61] H. Kang, T. Yamaguchi, H. Yoshikawa, „Accurate phase-added stereogram to improve the coherent stereogram”, *Appl. Opt.* 47, D44-D54 (2008).
- [62] M. Chlipała, T. Kozacki, „Resolution limits in holographic display with LED illumination”, *Proc. SPIE*, 9527-11 (2015).
- [63] T. Kozacki, M. Chlipała, P. Makowski, „Color Fourier orthoscopic holography with laser capture and LED display”, *Opt. Express* 26, 12144-12158 (2018).
- [64] G. Stroke, „Lensless Fourier-transform method for optical holography”, *Appl. Phys. Lett.* 6, 201–203 (1965).
- [65] A. Golos, W. Zaperty, G. Finke, P. Makowski, T. Kozacki, „Fourier RGB synthetic aperture color holographic capture for wide angle holographic display”, *Proc. SPIE* 9970, 99701E (2016).
- [66] D. Claus, D. Iliescu, P. Bryanston-Cross, „Quantitative space-bandwidth product analysis in digital holography”, *Appl. Opt.* 50, H116-H127 (2011).
- [67] P. Makowski, W. Zaperty, T. Kozacki, „Digital hologram transformations for RGB color holographic display with independent image magnification and translation in 3D”, *Appl. Opt.* 57, A76-A85 (2018).
- [68] V.M. Bove, W.J. Plesniak, T. Quentmeyer, J. Barabas, „Real-time holographic video images with commodity PC hardware”, *Proc. SPIE* 5664, 255-262 (2005).
- [69] D. Smalley, Q. Smithwick, V. Bove, J. Barabas, S. Jolly, „Anisotropic leaky-mode modulator for holographic video displays”, *Nature* 498, 313–317 (2013).
- [70] Y. Takaki, N. Okada, „Hologram generation by horizontal scanning of a high-speed spatial light modulator”, *Appl. Opt.* 48, 3255-3260 (2009).
- [71] L. Onural, F. Yaraş, H. Kang, „Digital holographic three-dimensional video displays”, *Proc. IEEE* 99, 576–589 (2011).
- [72] S. Benton, V. Bove, *Holographic Imaging*, (John Wiley & Sons, 2008).
- [73] D. Leseberg, O. Bryngdahl, „Computer-generated rainbow holograms”, *Appl. Opt.* 23, 2441-2447 (1984)
- [74] H. Yoshikawa, H. Taniguchi, „Computer generated rainbow hologram”, *Opt. Rev.* 6, 118-123 (1999).
- [75] H. Yoshikawa, T. Yamaguchi, „Computer-generated holograms for 3D display”, *Chin. Opt. Lett.* 7, 1079-1082 (2009).

- [76] T. Yamaguchi, H. Yoshikawa, „Real time calculation for holographic video display”, Proc. SPIE 6136, 61360T (2006).
- [77] T. Kozacki, M. Chlipala, H. Choo, „Fourier rainbow holography”, Opt. Express 26, 25086-25097 (2018).
- [78] R. Cicala, „The Camera Versus the Human Eye”, <https://petapixel.com/2012/11/17/the-camera-versus-the-human-eye>.
- [79] H. Choo, M. Chlipala, T. Kozacki, „Visual perception of Fourier rainbow holographic display”, ETRI Journal 41, 1225-6463 (2019).
- [80] Y. Takaki, Y. Matsumoto, T. Nakajima, „Color image generation for screen-scanning holographic display”, Opt. Express 23, 26986-26998 (2015).
- [81] M. Park, B. Lee, J. Son, O. Chernyshov, „Properties of DMDs for holographic displays”, Journal of Modern Optics. 62, 1600-1607 (2015).
- [82] D. Wang, S. Wei, „Characterization of a Digital Micromirror Device for Computer Generated Video Holography”, *Fourth International Conference on Image and Graphics*, 855-862 (2007).
- [83] M. Chlipala, T. Kozacki, „3D color reconstructions in single DMD holographic display with LED source and complex coding scheme”, Proc. SPIE 10335, 103350Y (2017).
- [84] S. Ping, Ch. Bingchao, C. Wenbo, M. Jianshe, C. Liangcai, „A holographic display system based on DMD using LED as light source”, Proc. SPIE 9970, 99700B (2016).
- [85] M. Kim, S. Lim, G. Choi, Y. Kim, H. Kim, and J. Hahn, „Expanded Exit-Pupil Holographic Head-Mounted Display with High-Speed Digital Micromirror Device”, ETRI Journal 40, 366-375 (2018).
- [86] W. Harm, C. Roider, S. Bernet, M. Ritsch-Marte, „Tilt-effect of holograms and images displayed on a spatial light modulator”, Opt. Express 23, 30497-30511 (2015).
- [87] H. Wang, D. Kuang, Z. Fang, „Diffraction analysis of blazed transmission gratings with a modified extended scalar theory”, J. Opt. Soc. Am. A 25, 1253-1259 (2008).
- [88] P. Tsang, T. Poon, W. Cheung, J. Liu, „Computer generation of binary Fresnel holography”, Appl. Opt. 50, B88-B95 (2011).
- [89] W. Cheung, P. Tsang, T. Poon, and C. Zhou, „Enhanced method for the generation of binary Fresnel holograms based on grid-cross downsampling”, Chin. Opt. Lett. 9, 120005- (2011).
- [90] T. Leportier, M. Park, Y. Kim, and T. Kim, „Converting optical scanning holograms of real objects to binary Fourier holograms using an iterative direct binary search algorithm”, Opt. Express 23, 3403-3411 (2015).
- [91] Reiner Eschbach, „Comparison of error diffusion methods for computer-generated holograms”, Appl. Opt. 30, 3702-3710 (1991).
- [92] M. P. Chang and O. K. Ersoy, „Iterative interlacing error diffusion for synthesis of computer-generated holograms”, Appl. Opt. 32, 3122-3129 (1993).
- [93] M. Chlipala, H. Choo, T. Kozacki, „Histogram based hologram binarization for DMD application”, Proc. SPIE 10834 (2018).