

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

Wrocław 27.05.2022

Recenzja

**Rozprawy doktorskiej**

**mgr inż. Jana Bolka**

**Dynamic Corrections of Optical Aberrations of a Spatial Light Modulator in  
Holographic Projection**

**Uwagi ogólne**

Przestrzenne modulatory światła (SLM) oparte o ciekłe kryształy cieszą się coraz większym powodzeniem we współczesnej optyce i fotonice. Zasadniczą przyczyną tej popularności jest fakt, że jedno urządzenie pozwala na generację struktur działających tak jak klasyczne elementy optyczne. Nadto łatwo można uzyskać odpowiednik elementów wcześniej nie dostępnych. Modulatory umożliwiają również na dynamiczną zmianę parametrów generowanych elementów optycznych. Nadto powszechnie są używane w projektorach komputerowych oraz w zastosowaniach związanych z dynamiczną holografia. Wadą modulatorów ciekłokrystalicznych jest ich słaba jakość optyczna, mała rozdzielczość, niestabilność czasowa ciekłych kryształów, wrażliwość temperaturowa. Wady odwzorowania optycznego można jednak korygować obliczając i implementując fazowe mapy korekcyjne, co jest powszechną praktyką.

W literaturze można znaleźć kilka metod korekcji SLM-ów. Zostały one umieszczone w liście referencji tej rozprawy doktorskiej. Najpopularniejsze metody to metoda interferometryczna i metoda bazująca na algorytmach iteracyjnych. Metody iteracyjne wymagają obrazu wzorcowego, którym w przypadku niniejszej pracy jest idealna punktowa funkcja rozmycia układu optycznego, w którym pracuje korygowany SLM.

Praca zawiera opis badań przeprowadzonych przez jej autora nad nową metodą korekcji SLMa. Badania zostały przeprowadzone metodami numerycznymi. Wyniki numeryczne zostały pozytywnie zweryfikowane w eksperymencie. Metoda jest w pełni gotowa do implementacji w układach pracujących z SLM-em.

We wprowadzeniu autor definiuje tezy pracy.

- Zaproponowana metoda umożliwia korekcję SLMa z precyzją bliską ograniczeniu wynikającemu ze zjawiska dyfrakcji.
- Korekcja może zostać przeprowadzona dynamicznie, co umożliwia pomiar termicznych zmian aberracji wprowadzonych przez SLM.

Praca poświęcona jest rozwojowi zaproponowanej przez autora metody korekcji SLMa. To wąsko określone zadanie wymaga jednak rozwiązania szeregu problemów naukowych i technicznych z czym autor dobrze dał sobie radę. W mojej opinii zaproponowane przez autora rozwiązanie postawionego problemu wyczerpuje wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Na podkreślenie zasługuje również fakt, że rozwiązany problem ma dużą wartość praktyczną i bardzo dobrze wpisuje się w profil działania grupy naukowej, w której praca była prowadzona.

Za rozprawą stoi jedna publikacja w wysoko notowanym czasopiśmie naukowym Optics Express. Liczba publikacji jest niska, co związane jest z charakterem tematu badawczego. Nie ma również odniesień do wystąpień konferencyjnych autora, co zwykle stanowi wartościowe doświadczenia dla każdego doktoranta.

Praca jest dobrze zorganizowana, rysunki są czytelne, treść jest zrozumiała. Poniżej przechodzę do szczegółowej oceny pracy.

### **Rozdział 1**

W tym krótkim rozdziale doktorant naświetla motywacje stojące za podjętym tematem, ze szczególnym uwzględnieniem zastosowań SLM-ów do projekcji holograficznej.

### **Rozdział 2**

Rozdział ten stanowi krótkie wprowadzenie aspektów teoretycznych i technicznych, które okażą się istotne w dalszej części rozprawy. Podane informacje odnoszą się do skalarnej teorii dyfrakcji, zagadnień rozdzielczości układów optycznych, holografii z uwzględnieniem holografii generowanej

komputerowo, zagadnieniom próbkowania. W ostatniej części podane są podstawowe informacje o ciekłych kryształach i wyświetlaczach ciekłokrystalicznych.

### **Rozdział 3**

Rozdział trzeci zaczyna się od przedstawienia pomysłu autora na metodę korekcji SLMA. Pomysł opiera się na pomiarze punktowej funkcji rozmycia układu optycznego z SLM-em w trzech różnych płaszczyznach. Jednak ruch kamery zastąpiony został dodaniem do SLMA wzoru fazowego imitującego działanie soczewki. Różnice między zmierzonymi funkcjami rozmycia a funkcją idealną jest miarą nieskorygowania SLMA. Poprzez zastosowanie odpowiedniej procedury iteracyjnej można istotnie zmniejszyć te różnice. Dla użytego algorytmu iteracyjnego niezbędne jest zdefiniowane kryterium po spełnieniu którego algorytm zatrzymuje się (warunek stopu). Autor zaproponował użycie wartości odchylenia średniokwadratowego (RMS) pomiędzy rozkładem natężenia w plamce na różnych stopniach iteracji. Następnie zdefiniował dwa warunki stopu: Pierwszy z nich ma charakter globalny odnoszący się do przyjętej arbitralnie wartości wzorcowej. Warunek ten ma za zadanie uniknięcia niebezpieczeństwa ugrzęźnięcia pętli iteracji w lokalnym minimum, którego wartość nie jest satysfakcjonująca. Drugi warunek mierzy RMS pomiędzy dwoma kolejnymi iteracjami. Zatrzymanie następuje gdy wartość RMS spada poniżej założonego poziomu.

W podrozdziale 3.4. opisana jest metoda pomiaru odległości pomiędzy detektorem kamery a SLMem. Pomiar nie wymaga dodatkowych elementów optycznych, co jest jego zasadniczą zaletą. W mojej ocenie zastosowana metoda daje wyniki w pełni wystarczające dla celów pracy.

- Na rysunku 3.3 jest drobny błąd w opisie osi pionowej

Zagadnieniu położenia przewężenia wiązki laserowej propagującej się w układzie optycznym poświęcona jest część (3.4.2). Choć autor twierdzi, że rysunek (3.4) wyjaśnia sprawę, w moim odczuciu przydałby się bardziej rozbudowany komentarz do kwestii w tekście rozprawy.

W końcowej części rozdziału, znajdziemy całościowo opisany iteracyjny algorytm będący osiłą stosowanej metody.

### **Rozdział 4**

Rozdział czwarty zawiera opis wyników numerycznych. Autor generuje losowo zbiór masek fazowych modelujących poszczególne aberracje Zernika. Maski te stanowią informację wejściową dla procedur opisujących numerycznie bieg światła w układzie optycznym. Do obliczeń autor używa tablic o bardzo dużych

rozmiarach, co czyni obliczenia dość wymagającymi pod względem czasu i zasobów użytego komputera. Wartościowe byłoby podanie więcej informacji na temat użytego oprogramowania potrzebnych zasobów sprzętowych i czasu obliczeń

## **Rozdział 5**

Rozdział 5 zawiera opis wyników eksperymentalnych. W pierwszym kroku podane są informacje o stronie technicznej eksperymentu. Opisany jest układ kontroli temperatury SLMa. Przeprowadzone następnie eksperymenty pokazują, że temperatura ma istotny wpływ na generowany przez modulator kształt plamki rozmycia. Następną serią pomiarową pokazała, że cztery iteracje wystarczają do osiągnięcia założonej jakości odwzorowania. W kolejnym kroku standardowy test optyczny USAF zostaje przeniesiony na SLMa i odwzorowany z dużą dokładnością. Zwraca uwagę duża zgodność uzyskanych obrazów z wynikami symulacji numerycznych. Na obrazach numerycznych i eksperymentalnych zgadza się nawet rozkład spekli. Rysunek (15) podkreśla znaczenie kontroli temperatury przy użyciu SLMa. Wyznaczając mapy korekcyjne dla temperatur w zakresie od 18°C do 35°C, doktorant pokazał, że efekty zmian temperatury mogą być skutecznie korygowane przez zmianę wyświetlanej mapy korekcyjnej.

Ostatnia część pracy poświęcona jest korekcji obrazów kolorowych. W zmodyfikowanym do tego celu układzie pomiarowym, powierzchnia SLMa podzielona zostaje na trzy części odpowiadające za pracę z trzema kolorami RGB. Odpowiednie trzy wiązki światła pochodzą z trzech różnych laserów. Wkłady z trzech oddzielnych części zostają, w dalszej części układu optycznego, zmieszane tworząc obraz kolorowy. Każda z trzech części SLMa zostaje skorygowana osobno wyznaczoną mapą fazową. Zmodyfikowany test USAF oraz kolorowe zdjęcie mały służyć za testy jakości uzyskanego barwnego odwzorowania. Pokazane zostało, że zaproponowana korekcja poprawia w widoczny sposób ostrość kształtów i wierność odwzorowanych kolorów. Ocena została przeprowadzona wizualnie, co biorąc pod uwagę, że obrazowanie barwne służy głównie do projekcji zdjęć i filmów, wydaje się metodą odpowiednią.

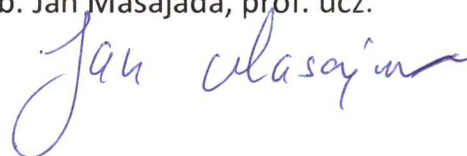
## **Rozdział 6**

Rozdział 6 zawiera wnioski płynące z pracy

## **Konkluzja**

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

dr hab. Jan Masajada, prof. ucz.

A handwritten signature in blue ink, reading "Jan Masajada". The signature is written in a cursive, flowing style.