

Dr hab. Jan Masajada, prof. ucz.
Katedra Optyki i Fotoniki
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

Wrocław 05.05.2021

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej

mgr inż. Marty Mikuły-Zdańkowskiej

Mikroskopia holograficzna z modulacją frontu falowego do wyznaczenia geometrii powierzchni elementów mikrooptyki

Uwagi ogólne

W współczesnych technikach pomiaru topografii powierzchni za dużą rozdzielczości płaci się dodatkowymi ograniczeniami związanymi z drogą technologią, złożoną analizą, inwazyjnością metody pomiaru, specjalnymi wymaganiami związanymi z przygotowaniem próbek lub długim czasem zbierania informacji jak to ma miejsce na przykład w technikach skaningowych. Metody holograficzne są pod tym względem bardzo łaskawe. Próbka oświetlona jest wiązką światła o małym natężeniu, czas pomiaru jest krótki a metody analizy obrazu relatywnie proste i dobrze znane. Ograniczenia metody holograficznej są typowe dla klasycznych metod optycznych i dotyczą ograniczenia rozdzielczości, pola widzenia i zakresu głębi pomiaru. Sprzężenie klasycznych optycznych metod pomiarowych z techniką komputerową i związaną z tym elektroniczną akwizycją i obróbką obrazów pozwala na poszerzenie możliwości klasycznych układów optycznych, przy zachowaniu ich najważniejszych zalet. Przedstawiona rozprawa idzie w tym kierunku.

Przedstawiona praca ma charakter praktyczny. Opracowane metody cyfrowej mikroskopii holograficznej zostały przetestowane na zbudowanych w tym celu układach optycznych. Przyjęte w pracy cele są aktualne i otwierają doktorantce drogę do uzyskania wartościowych wyników. Opracowane metody, według mojej wiedzy, są nowe i dobrze wpisują się w profil działań badawczych grupy optyków z Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej.

Przedstawiona rozprawa wsparta jest trzema artykułami z tzw. listy filadelfijskiej w czasopismach o bardzo dobrej renomie: dwa zostały opublikowane w Applied Optics i jeden w Optics Express. Warto podkreślić, że artykuł w Applied Optics (nr 74 w liście publikacji)

został wyróżniony mianem „Editor’s Pics”. Nadto doktorantka ma na koncie trzy publikacje konferencyjne. Dorobek ten dobrze świadczy o wartości przedstawionej rozprawy.

Szczegółowe omówienie i ocena treści rozprawy

Rozdział 1

Rozdział pierwszy określa cele pracy. Stwierdzam, że określone cele są zgodne z przedstawionym w rozprawie tokiem badań.

Autorka stwierdza, że „.... Zaproponowane metody znacząco przyczynią się do rozwoju optycznych metod polowych....”. To bardzo odważne stwierdzenie. Bywa, że nawet bardzo obiecujące rozwiązania nie wnoszą istotnego wkładu do dziedziny. Kwestia dalszego sukcesu, nawet owocnych badań, zależy od bardzo wielu czynników i trudno tu być prorokiem, chyba że autorka ma mocne ku temu przesłanki.

Rozdział 2

Rozdział drugi jest rozdziałem poświęconym wprowadzeniu do znanych optycznych metod pomiarów geometrii powierzchni. W szczególności, dokładniej omówiona jest cyfrowa mikroskopia holograficzna. Dobór omówionych metod dobrze wpisuje się w treść badawczej części rozprawy. Ilość podanej informacji jest dobrze wyważona. Mam jednak następujące uwagi:

Osobiście jestem przeciwnikiem niepotrzebnych „naj”. Dlatego zapytam się skąd doktorantka wie, że „najczęściej wykorzystywaną metodą pomiarową jest interferometria koherencyjna”? (strona 12).

Myślę, że stwierdzenie „superpozycja poszczególnych długości fal tworzy światło białe” (strona 13) jest niepotrzebne. Powody są przynajmniej dwa: po pierwsze w technikach koherencyjnych nie musimy się ograniczać do światła widzialnego, po drugie szerokość spektralna źródła nie musi być tak szeroka aby tworzyć światło białe.

W podsumowaniu rozdziału (punkt 2.3) znajduje się stwierdzenie: „....Ze względu na to, została ona wykorzystana (chodzi o cyfrową mikroskopię holograficzną DHM) w przeprowadzonych badaniach na rzecz niniejszej rozprawy”. Doktorantka nie wykorzystuje DHM do badań, tylko prowadzi badania nad rozszerzeniem funkcjonalności DHM.

Rysunek 17 brak jest kątów u_1 i u_2 . Rysunek jest mało wyraźny.

Rozdział 3

Rozdział trzeci zawiera informacje dotyczące holograficznych metod badania powierzchni w tym dokładniej omówiona jest cyfrowa mikroskopia holograficzna. Większy nacisk położono na omówienie kwestii ograniczenia powierzchni pola pomiarowego oraz pomiaru przedmiotów z uskokiem, co bezpośrednio odnosi się do tematyki rozprawy. Na bazie przeprowadzonego przeglądu literatury, doktorantka sprawnie wykazała zasadności podjętych w pracy badań. Ponownie konstrukcja rozdziału oraz ilość i wartość merytoryczna zawartych w niej informacji nie budzi moich zastrzeżeń.

Rozdział 4

Krótki rozdział czwarty zawiera opis próbek służących do testowania rozwijanych przez doktorantkę technik pomiarowych. Zawarte informacje, z punktu widzenia celów pracy, uznaję za kompletne i zaprezentowane w czytelny sposób

Rozdział 5

Rozdziały 5, 6 i 7 należą do najistotniejszych w rozprawie, gdyż zawierają opis wyników osiągniętych przez doktorantkę. Rozdział 5 poświęcony jest pomiarom obiektów o dużym promieniu krzywizny. Opisany jest system pomiarowy metoda jego kalibracji oraz procedury pomiarowe. Działanie całości zostało przetestowane na wybranych próbkach wzorcowych. Opis układu cyfrowego mikroskopu holograficznego jest kompletny. Podobnie jest z opisem kalibracji układu i kompensacji aberracji sferycznej.

Stwierdzenie „oprogramowanie zostało stworzone” (str. 46) nie jest wystarczająco precyzyjne. Nie można na jego podstawie wnioskować czy zostało napisane przez doktorantkę czy przez członków zespołu.

Następnie doktorantka opisuje algorytm rekonstrukcji obrazu oparty o metodę LRA z pracy [110]. Zamieszczone tu wzory nie są jasne. Zastanawia n -ta potęga przy k . Stojące po prawej strony równości, wyrażenie zawiera k w drugiej potędze, pozostaje pytanie o zgodność wymiaru lewej i prawej strony równania znajdującego się pomiędzy równaniami (R.26) i (R.27). To samo dotyczy wzoru (R.26). Zmieniając n przy k zmieniamy wymiar wyrażenia z prawej strony tego równania. Po lewej stronie stoi współrzędna x_s , której wymiar jest niezależny od n . Sprawy nie ułatwia fakt, że nie ma bezpośredniego odniesienia do wzorów podanych w pracy [110]. Biorąc pod uwagę niejasności w zapisie i brak analogicznie zapisanych wzorów we wskazanym odniesieniu literaturowym punkt ten warto wyjaśnić.

Oszacowane są też niedokładności justowania układu oraz ich wpływ na pomiar topografii. Doktorantka zastosowała algorytm oznaczany jako BM3D do odszumiania zarejestrowanych interferogramów. Przeprowadzone testy wykazały, że opisane wyżej elementy składają się na sprawnie działający system pomiarowy, pozwalający na poszerzenie pola pomiarowego przy zachowaniu dużej dokładności metody.

Rozdział 6

Rozdział 6 przedstawia wyniki badań nad metodami wykorzystującymi zmienne nachylenie fali przedmiotowej.

Doktorantka przedstawia i analizuje trzy strategie pomiarowe. Każda z nich jest analizowana ze względu na zakres zmienności kątów, ilość rejestrowanych hologramów i innych parametrów. Analiza teoretyczna i numeryczna wsparta jest eksperymentem przeprowadzonym na układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku (71). Rolę aktywnego elementu służącego do zmiany kąta nachylenia fali oświetlającej próbkę pełni ciekłokrystaliczny przestrzenny modulator światła (SLM). Konstrukcja interferometru jest dokładnie opisana w kolejnych podrozdziałach. Przeprowadzone następnie pomiary wykazały dużą zgodność z wynikami symulacji numerycznych. W końcu doktorantka mierzy wzorcowy przedmiot schodkowy i porównuje je z pomiarami przeprowadzonymi za pomocą optycznego

profilometru NT 2000 firmy Veco. To co rzuca się w oczy to fakt, że pomiary przeprowadzone z urządzeniem Veco muszą zostać podzielone na dwie części, gdyż pojedynczy pomiar nie obejmuje całości próbki. Widać tu wyraźnie przewagę metody badanej przez doktorantkę.

W ostatniej części rozdziału 6 doktorantka przedstawia wyniki badań nad pomiarami przeprowadzonymi techniką multipleksingu kątowego. Metoda ta ma zasadniczą zaletę, pozwala przeprowadzić pomiar z jednym ujęciem hologramu. Technika demultipleksingu jest czysto cyfrowa i opiera się na algorytmach fourierowskich.

Iterator α_i w sumie we wzorze (R.35) jest niemy. Nie wiadomo po czym jest sumowanie. Można się tego domyślać, ale lepiej jest jeżeli istotne wzory nie zmuszają czytelnika do takich domysłów.

Rozdział 7

Rozdział 7 poświęcony jest kalibracji użytego w pracy SLMa. Autorka zaproponowała użycie własnej metody bazującej na efektach polaryzacyjnych, dzięki czemu była w stanie uzyskać dokładny przebieg krzywej kalibracyjnej.

Zwykle przy wykorzystaniu SLMa korzysta się również z korekcyjnych map fazowych mających na celu kompensację wad powierzchni urządzenia. Doktorantka nie wspomina jednak o zastosowaniu takiej mapy.

Rozdział 8.

Rozdział 8 zawiera podsumowanie całej pracy.

Doktorantka uzyskała poszerzenie pola pomiarowego w porównaniu z konwencjonalną metodą DHM w istotnym zakresie. Nowy układ pomiarowy umożliwia również pomiar próbek wymagających zwiększonej głębi ostrości. Na zakończenie autorka przedstawia dojrzawy plan dalszych prac nad rozwojem własnego systemu pomiarowego

Strona edytorska

Układ pracy jest czytelny. Język rozprawy jest zrozumiały i zasługuje na wysoką ocenę. Doktorantka nie ustrzegła się drobnych błędów edytorskich. Na przykład na stronie 34 symbol SP powinien być zastąpiony symbolem SF. Znalazłem również nieliczne potknięcia językowe. Jednak muszę stwierdzić, że jest ich wyraźnie mniej niż w innych rozprawach jakie przyszło mi recenzować. Poważniejszy błąd edytorski znalazłem w spisie literatury. W 30 pozycjach brak jest nazwy czasopisma. Są to pozycje numer: 2, 6, 12, 13, 14, 15, 26, 27, 28, 41, 42, 43, 55, 100, 101, 103, 104, 105, 109, 112, 120, 124, 133, 146, 147, 154, 155, 156, 159, 160.

Podsumowanie

W pracy zaprezentowano kompletny system pomiarowych cyfrowej mikroskopii holograficznej o poszerzonym polu pomiarowym i zwiększonej możliwości pomiarów próbek zwierających głębokie uskoki. Na podkreślenie zasługuje fakt, że zaprezentowano kompletny

system, który wraz z procedurami kalibracji kompensacji aberracji, akwizycji i analizy wyników.

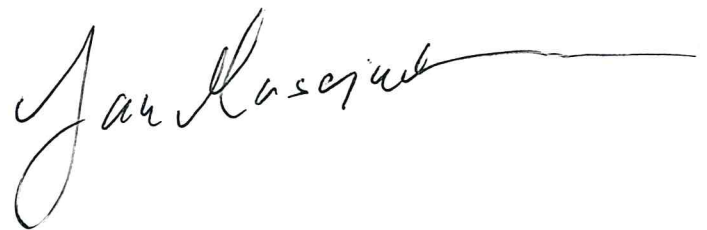
Osiągnięte wyniki jak i kompleksowość prac robią bardzo dobre wrażenie i pozwalają stwierdzić, że cele pracy zostały osiągnięte. Brakuje mi jednak dwóch trzech przykładów pomiaru obiektów bardziej złożonych niż testowe.

Wskazane wyżej uwagi krytyczne i komentarze nie mają istotnego wpływu na wysoką ocenę 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.

Biorąc pod uwagę kompleksowość zaprezentowanych rozwiązań, staranność w prowadzeniu eksperymentu, oraz klarowność przedstawionej rozprawy doktorskiej uważam, że jest to jedna z lepszych rozpraw jaki przyszło mi w ostatnich latach recenzować. Z tej perspektyw wnoszę o jej wyróżnienie.

A handwritten signature in black ink, reading "Jan Kasprzak". The signature is written in a cursive style with a long horizontal flourish extending to the right.