

Warszawa, 6 września 2021 r.

prof. dr hab. inż. Robert Sitnik  
Kierownik Zakładu Technik Rzeczywistości Wirtualnej  
Instytut Mikromechaniki i Fotoniki  
Wydział Mechatroniki  
Politechniki Warszawskiej  
ul. Boboli 8  
02-525 Warszawa

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej pod tytułem

Modelowanie dokładności optycznych współrzędnościowych maszyn  
pomiarowych

autorstwa mgr inż. Wiktora Harmatysa  
wykonanej pod kierunkiem promotora  
prof. dr hab. inż. Jerzego A. Śładka  
oraz promotora pomocnicznego  
dr hab. inż. Adama Gąskę, prof. PK

Praca dostarczona w formie maszynopisu sygnowanego przez Wydział Mechaniczny Politechniki Krakowskiej (2021). Recenzja została zlecona przez Prodziekana Wydziału Mechanicznego PK prof. dr hab. inż. Marka Kozienia (pismo z 7 lipca 2021 r). Praca była realizowana na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej.

### 1. Zagadnienia naukowe rozpatrywane w rozprawie

Podstawowym celem Autora było opracowanie modelu funkcjonalnego optycznej maszyny współrzędnościowej wraz z modelem optycznej identyfikacji punktów pomiarowych. Istotnym elementem tych prac było zaproponowanie i opracowanie modelu symulacyjnego do szacowania niepewności pomiaru optycznego on-line oraz zaproponowanie metod korekcji mierzonych wartości w zależności od warunków i parametrów pomiaru. Tematyka ta jest aktualnym obszarem zainteresowania środowisk naukowych z obszaru inżynierii mechanicznej, a w szczególności metrologii współrzędnościowej. Dodatkowo ma ona znaczący wymiar praktyczny ze względu na rosnącą popularność pomiarów optycznych i hybrydowych (stykowo-optycznych). Szkoła naukowa z której Autor się wywodzi od wielu lat aktywnie



zajmuje się aspektami metrologicznymi w pomiarach optycznych. Badania nad opracowaniem nowych rozwiązań z obszaru metrologii optycznej są aktualnym obszarem do zdobywania wiedzy i realizacji badań naukowych.

Autor w swojej pracy sformułował hipotezę „*Możliwe jest opracowanie modelu optycznej identyfikacji punktów zarysów mierzonych i jego integracji w model funkcjonalny optycznej współrzędnościowej maszyny pomiarowej z zastosowaniem do korekcyjnej dokładności oraz opracowania oprogramowania symulacyjnego do szacowania niepewności pomiaru on-line*”.

Aby zrealizować główny cel pracy i potwierdzić sformułowaną hipotezę Autor musiał wykonać szereg zadań z których najważniejsze to:

- zidentyfikowanie głównych źródeł błędów układu optycznego, matrycy i sposobu przetwarzania wpływających na niepewność pomiaru,
- przebadanie wpływu najważniejszych parametrów w pomiarach optycznych jakimi są rodzaj i intensywność oświetlenia sceny oraz kinematyka maszyny względem osi optycznej kamery,
- automatyzacja doboru intensywności oświetlenia sceny pozwalająca na zachowanie najlepszych parametrów pomiarowych,
- opracowanie obiektu testowego pozwalającego na ocenę poprawności szacowania dokładności opracowanego modelu,
- opracowanie oprogramowania symulacyjnego realizującego koncepcję współrzędnościowej maszyny optycznej.

Podsumowując, zagadnienia naukowe i praktyczne (aplikacyjne) podjęte przez Autora pracy są aktualne i należą do obszaru badań rozwojowych i przemysłowych w dziedzinie inżynieria mechaniczna (dawniej inżynieria produkcji).

Na podkreślenie zasługuje fakt, że tematyka pracy ma charakter badawczy i jednocześnie praktyczny co potwierdza dojrzałość warsztatu pracy Autora. Opracowany przez niego model ma szanse na praktyczne wykorzystanie ze względu na rosnącą popularność pomiarów hybrydowych (optyczno-stykowych).

## **2. Charakterystyka pracy**

Przedstawiona rozprawa doktorska podzielona została na jedenaście rozdziałów włączając spis literatury. Spis literatury obejmuje 104 pozycje literaturowe włączając pozycje w których współautorem jest mgr inż. Wiktor Harmatys, 23 wskazania na normy i przewodniki ISO oraz 1 pozycję ze stroną internetową. Do pracy zostały dołączone streszczenia w języku polskim i angielskim. Znajduje się w niej także spis treści.

Rozdział pierwszy jest wprowadzeniem do pracy przedstawiającym specyfikę współrzędnościowych maszyn pomiarowych w których coraz częściej istotnym elementem jest kamera cyfrowa wspierająca realizację pomiarów z wykorzystaniem technik przetwarzania obrazu. W kolejnej części rozdziału znajduje się krótka dyskusja na temat aktualnego stanu wiedzy w zakresie modelowania i korekcji błędów we współrzędnościowych maszynach pomiarowych. W końcowej części rozdziału dyskutowana jest koncepcja związana z wirtualną maszyną pomiarową (tzw. Virtual CMM). Rozdział kończy się stwierdzeniem, że w

aktualnym stanie wiedzy brak jest modelu optycznej identyfikacji punktów zarysów mierzonych oraz deklaracją Autora, że podejmuje się realizacji tej tematyki w pracy.

Uwagi krytyczne i dyskusyjne:

1) Geometryczne pomiary optyczne mogą być realizowane w co najmniej dwóch wariantach:

- w przestrzeni obrazu (lub na płaszczyźnie) – wtedy wyznaczone są dwie współrzędne (tzw. przetwarzanie 2D),
- w przestrzeni trójwymiarowej – wtedy mowa jest o pomiarze przestrzennym (tzw. skanowaniu 3D).

Zabrakło we wstępie tego podziału i stwierdzenia, że Autor skupia się tylko na analizach w płaszczyźnie.

Rozdział drugi poświęcony jest dokładniejszemu omówieniu współrzędnościowej techniki pomiarowej ze szczególnym uwzględnieniem głowic optycznych. Autor skupił się na tematyce związanej z niezależnymi systemami skanującymi oraz na głowicach zintegrowanych we współrzędnościowych maszynach pomiarowych.

W rozdziale trzecim Autor przedstawił analizę stanu wiedzy z zakresu tematyki pracy. Rozpoczął od dyskusji źródeł błędów obrazowania w układach obiektywów stosowanych z detektorami macierzowymi typu CCD lub CMOS. Opisał aberrację sferyczną, komeę, astygmatyzm i dystorsję. Następnie skupił się na aspektach przetwarzania obrazu na podstawie którego wyznaczone są końcowe współrzędne pomiarowe. Opisał ogólną budowę matrycy z uwzględnieniem rozwiązań w kamerach barwnych. Przedyskutował także wybrane metody rozpoznawania krawędzi obiektów w obrazach cyfrowych. Przedstawił też wpływ układów automatycznego ustawiania ostrości na dokładność wyznaczania krawędzi. Zaprezentował stosowane metody do oceny dokładności pomiarów optycznych takie jak: porównawczą, wielopozycyjną oraz symulacyjną. Przedyskutował zagadnienia wzorcowania współrzędnościowych optycznych systemów pomiarowych.

Uwagi krytyczne i dyskusyjne:

2) Ze względu na planowanie wydanie pracy recenzent prosi o przededagowanie podrozdziału 3.1 dotyczącego dokładności odwzorowania w układach obiektywów do kamer macierzowych. Znajduje się tam wiele nieścisłości i nieprofesjonalnych sformułowań (*przykładowo: „Ogólny podział soczewek dzieli się na....” – powinno być elementów optycznych, dodatkowo też są soczewki asferyczne, które są coraz częściej stosowane i mają inną charakterystykę błędów obrazowania; Autor też pisze, że rozróżnia się sześć podstawowych aberracji optycznych a wymienia tylko pięć, a dalej opisuje tylko cztery z wymienionych*).

3) Opis histogramu wymaga poprawy ze względu na mało precyzyjne sformułowania. Histogram jest pewną miarą statystyczną obrazu a wykres go przedstawiający jest tylko jedną z możliwych form wizualizacji. Autor upraszcza zagadnienie utożsamiając wizualizację z danymi. Dodatkowo histogram nie zawsze ma 256 wartości. Zależy to od zastosowanego przetwornika w układzie analogowo-cyfrowym. Jeśli przetwornik będzie miał 10 bitów to histogram będzie miał 1024 wartości.

4) W rozdziale trzecim brakuje opisu zagadnień związanych z szumami występującymi w obrazach cyfrowych. W mojej opinii powinny być wymienione wszystkie czynniki wpływające

na szum w obrazie a opisane co najmniej dwa najbardziej znaczące: szum termiczny (ang. thermal noise) oraz szum ciemny (ang. dark noise).

5) Na Rysunku 22 Autor przedstawia wynik zastosowania filtru Sobela a nigdzie w tekście nie opisuje zasady jego działania (choć inne filtry są opisane).

W rozdziale czwartym Autor przedstawił hipotezę, cel i zakres pracy. Hipoteza sformułowana jest w sposób następujący: „*Możliwe jest opracowanie modelu optycznej identyfikacji punktów zarysów mierzonych i jego integracji w model funkcjonalny optycznej współrzędnościowej maszyny pomiarowej z zastosowaniem do korekcyjnej dokładności oraz opracowania oprogramowania symulacyjnego do szacowania niepewności pomiaru on-line*”. Cel główny i cele szczegółowe są rozwinięciem hipotezy na konkretne działania i zostały przez mnie opisane w części pierwszej recenzji.

Uwagi krytyczne i dyskusyjne:

6) Moim zdaniem w hipotezie jest błąd w sformułowaniu „...z zastosowaniem do korekcyjnej dokładności...”. Powinno być korekcji zamiast korekcyjnej.

Rozdział piąty poświęcony jest identyfikacji źródeł błędów związanych z odwzorowaniem optycznym we współrzędnościowych maszynach pomiarowych. Autor przedstawia schemat ze źródłami błędów a następnie w kolejnych podrozdziałach opisuje swoje badania nad jakością podświetlenia, jej wpływem na wyniki pomiarów oraz powtarzalnością. Zajmuje się też modelowaniem prawdopodobieństwa odtworzenia punktów, modelowaniem wpływu temperatury na pomiary optyczne oraz modelowaniem błędów związanych z automatycznym doбором płaszczyzny ostrości. Badania opisane w tym rozdziale są znaczącym wkładem autora i stanowią podstawę pod opracowanie modelu zaprezentowanego w kolejnym rozdziale.

Uwagi krytyczne i dyskusyjne:

7) Sformułowania używane przez Autora są skrótami myślowymi, które muszą być poprawione w końcowej wersji (przykładowo: tytuł podrozdziału 5.1 – niepotrzebny przecinek; tytuł podrozdziału 5.3 – powinno być Badanie powtarzalności pomiaru współrzędnych punktu a nie „pomiaru punktu”; podobnie w tytule podrozdziału 5.5 – powinno być Modelowanie wpływu temperatury a nie Modelowanie temperatury). Zalecałbym też, zastąpienie słowa Autofocus zwrotem układem automatycznego ustawiania płaszczyzny ostrości – co najmniej gdzieś raz w pracy.

W rozdziale szóstym przedstawiony jest opracowany przez Autora model matematyczny współrzędnościowej maszyny optycznej. Autor skupił się na szczegółowym omówieniu głównych aspektów modelu do których należą symulacje: współrzędnych punktów w zależności od rodzaju użytego podświetlenia (bardzo ciekawe podejście w zależności od wektora kierunkowego mierzonego punktu uwzględniające łączenie charakterystyk o różnym profilu), błędów związanych ze zmianą temperatury otoczenia oraz maszyny, powtarzalności systemu oraz zastosowaniem systemu automatycznego doboru płaszczyzny ostrości.

Rozdział siódmy dotyczy weryfikacji opracowanego modelu. Autor przedstawił opracowany przez siebie obiekt testowy pozwalający na pomiar wymiarów w oświetleniu od strony przeciwnej niż kamera. Opisał procedurę wzorcowania obiektu testowego oraz przedyskutował otrzymane wyniki. Następnie przeprowadził procedurę walidacji modelu z

wykorzystaniem koncepcji kontroli spójności. Rozdział kończy się stwierdzeniem, że opracowaną metodę symulacji można uznać za zwalidowaną (przedziały ufności pomiędzy metodami wielopozycyjną, porównawczą i symulacyjną pokrywają się).

Rozdział ósmy poświęcony jest opisowi prac jakie wykonał Autor w celu zintegrowania swojej implementacji metod do symulacji z oprogramowaniem Calypso. Zamierzeniem tych prac było umożliwienie stosowania opracowanego rozwiązania w trybie on-line z współrzędną maszyną pomiarową.

W rozdziale dziewiątym znajduje się podsumowanie rozprawy podzielone na części poznawczą i użytkową. W kolejnych akapitach przedstawione są wyniki prac i badań Autora jednoznacznie wykazujące, że udowodnił on prawdziwość tezy rozprawy. W tym rozdziale nakreślone są też dalsze kierunki badań.

Uwaga dyskusyjna ogólna:

8) Prosiłbym o dyskusję ograniczeń odnośnie geometrii obiektów mierzonych opracowaną metodą. Chodzi mi o sposób podświetlania obiektu od dołu czy jakimkolwiek innym oświetleniem w którym kamera w zależności od kąta obserwacji będzie widziała inne fragmenty krawędzi.

### 3. Podsumowanie

Podsumowując, przedstawiona praca zatytułowana „*Modelowanie dokładności optycznych współrzędnościowych maszyn pomiarowych*” jest osiągnięciem Autora, które znamionuje się oryginalnością w obszarze naukowym oraz praktycznym. W obszarze naukowym Autor osiągnął zakładany cel co jest udokumentowane publikacjami w czasopiśmie. W obszarze praktycznym Autor integrował swoje algorytmy z oprogramowaniem Calypso przez co umożliwił realizację pomiarów on-line. Udowodnił także, że posiada umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna (dawna dyscyplina inżynieria produkcji). Dodatkowo, uważam, że jego praca może być wydana w formie monografii Politechniki Krakowskiej po uwzględnieniu moich uwag oraz korekcie edytorskiej ze względu na dużą liczbę błędów stylistycznych i redakcyjnych.

Biorąc pod uwagę wszystkie elementy pracy stwierdzam, że przedstawiona do oceny praca spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim i może być podstawą do nadania stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna oraz wnoszę jednocześnie o dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrony.

