

dr hab. inż. Ksenia Ostrowska, Prof. PK
Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej (M10)
Wydział Mechaniczny
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Piotra Siekańskiego

„METODA LOKALIZACJI KAMERY W ZŁOŻONYCH WARUNKACH ŚRODOWISKOWYCH NA POTRZEBY ANALIZY DANYCH 3D”

Podstawa opracowania:

Uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej z dnia 02.03.2022 zlecenie Dziekana Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej Prof.dr hab.inż.Gerarda Cybulskiego z dnia 07.03.2022 znak: WMt.521.3.2022

1. Charakterystyka ogólna

We współczesnym świecie, następuje bardzo szybki rozwój technologii a w konsekwencji także rozwój kontroli jakości. Dzięki temu możliwa jest weryfikacja geometrii większości badanych obiektów. Dynamiczny rozwój widoczny jest szczególnie wśród urządzeń dedykowanych do pomiarów optycznych. Rosnąca dokładność i krótki czas pomiaru wypierają inne metody tworzenia modeli wirtualnych. Pomiar i obrazowanie realizowane jest poprzez wyznaczenie geometrii powierzchni reprezentowanej w postaci chmury punktów w określonym czasie. Dzięki temu systemy te mogą być z powodzeniem wykorzystywane do wizualizacji przebiegu procesu kontroli.

Praca doktorska mgr inż. Piotra Siekańskiego poświęcona metodzie lokalizacji kamery w złożonych warunkach środowiskowych na potrzeby analizy danych 3D wpisuje się właśnie w obszar współczesnej metrologii współrzędnościowej mieszcząc się w dyscyplinie - inżynieria mechaniczna.

2. Układ i obszar merytoryczny monografii:

Recenzowana praca liczy 151 stron i składa się z 8 rozdziałów w tym spisu treści, spisu pojęć, rysunków i tabel używanych w pracy, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz bibliografii w której zamieszczono 159 pozycji.

Rozdział 1 - Wprowadzenie zawiera motywację, a także tezy badawcze i cel rozprawy - w którym Autor zwraca uwagę na zapotrzebowanie na dokładne określenie orientacji i pozycji kamer w systemach wizyjnych, co umożliwi dokładniejsze składanie poszczególnych skanów w czasie rzeczywistym.

Celem pracy – jak opisuje Autor jest poszerzenie zakresu stosowalności metod lokalizacji kamer w złożonych warunkach środowiskowych na potrzeby analizy danych 3D, poprzez opracowanie nowych metod kalibracji i przetwarzania danych 2D i 3D. Autor definiuje też wymagania jakie powinny spełniać proponowane przez Niego metody, które ujął następująco:

- Opracowane rozwiązania powinny działać w czasie rzeczywistym, tj. całkowity czas lokalizacji kamery nie powinien być dłuższy niż 1/15 sekundy, ponieważ jest to minimalna częstotliwość umożliwiająca poprawną percepcję otoczenia przez człowieka w połączeniu z działaniami psychomotorycznymi.
- Opracowane rozwiązania nie powinny także wymagać jakiegokolwiek udziału operatora ani inicjalizacji w znanym położeniu początkowym.

Sformułował też szczegółowe cele naukowe pracy:

- opracowanie metody beznacznikowego wyznaczania pozycji kamer względem modelu w postaci chmury punktów niezależnie od metody użytej do jej pozyskania,
- opracowanie metody wyznaczania względnej pozycji wielu kamer w obecności zakłóceń w warunkach przemysłowych,
- opracowanie metody lokalizacji pary kamer pracujących w różnych modalnościach (pasmo widzialne i termowizja) we wspólnym układzie współrzędnych oraz metody beznacznikowej korekcji mapowania obrazów w czasie rzeczywistym.

Rozdział 2 Metody wyznaczania punktów charakterystycznych na obrazach – to przegląd rozwiązań dotyczących wyznaczania pozycji i orientacji kamery w układzie współrzędnych, związanym z modelem 3D bazującym na odpowiadających sobie punktach 3D, w tym układzie współrzędnych i ich projekcjach na matrycę kamery. W rozdziale zostały przedstawione metody znacznikowe i beznacznikowe wraz z algorytmami ich implementacji. Znajdujemy w tym rozdziale całe procesy dopasowania według opisanych metod, jak również ich krótką analizę.

Rozdział 3 Wyznaczanie pozycji i orientacji kamery- przedstawia metody znane z literatury wyznaczenia orientacji i pozycji kamery względem danych 2D oraz 3D. Opisano też modele kamer używanych do akwizycji danych pomiarowych. Autor przedstawił też ważne kwestie związane z kalibracją kamery pojedynczej jak i układu kamer we wspólnym układzie współrzędnych. Szczegółowo omówił zagadnienia i algorytmy wykorzystywane przy zadaniu obliczenia projekcji punktów w globalnym układzie współrzędnych na matrycę kamery, której układ lokalny nie pokrywa się z globalnym (*PnP* (ang. *Perspective-n-point problem*), algorytmy: P3P, ePnP i RANSAC). W praktyce odpowiadające sobie punkty w globalnym układzie współrzędnych i ich projekcje na matrycę kamery są często znane, natomiast poszukiwana jest pozycja i orientacja kamery w globalnym układzie współrzędnych.

Rozdział 4 Techniki skanowania 3D – W rozdziale tym przedstawione zostały powszechne techniki bezstykowego skanowania 3D. Autor opisał metody działające na zasadzie fotogrametrii, SfM (ang. Structure from Motion), światła strukturalnego, czasu przelotu wiązki (ang. Time of flight, TOF) oraz triangulacji laserowej. Opisał ich zasady działania wraz z krótką charakterystyką zalet i problemów w ich użytkowaniu.

Rozdział 5 Metoda bezznacznikowego wyznaczania pozycji kamery względem modelu w postaci chmury punktów niezależnie od metody użytej do jego pozyskania- przedstawia algorytmy wykorzystywane do lokalizacji kamery względem chmury punktów, które Autor wzbogaca o własne rozwiązania pozwalające na wyznaczanie punktów charakterystycznych i ich deskryptorów. Dzięki znajomości współrzędnej 3D w każdym pikselu następuje powiązanie współrzędnych 3D na modelu i deskryptorów 2D. Nowością opracowanej metody jest przygotowanie danych w oparciu o generowanie ortograficznych obrazów syntetycznych. Autor opracował metodę wyznaczania wymaganej rozdzielczości obrazów oraz algorytmy do segmentacji chmury punktów, określenia obszarów quasi-płaskich i wyznaczania pozycji wirtualnej kamery. W rozdziale została podjęta próba walidacji metody, jak również weryfikacji poprawności działania przedstawionego rozwiązania na rzeczywistych obiektach jakimi były wnętrza w Muzeum Pałacu Króla Jana III w Wilanowie (Gabinet Chiński Króla oraz Gabinet al Fresco).

Rozdział 6 Metoda wyznaczania względnej pozycji układu kamer w obecności zakłóceń w warunkach przemysłowych- przedstawia zaproponowane przez Autora rozwiązanie, dedykowane do kalibracji skanerów 3D wykorzystujących triangulację laserową, umożliwiające obrazowanie w pełnym zakresie kątowym przy zastosowaniu dowolnej liczby par laser-kamera.

Rozwiązanie zostało zaimplementowane do rzeczywistego zadania bezpośrednio w prototypowym skanerze 3D wykorzystującym 6 systemów kierunkowych do pomiaru kłód drewna na linii produkcyjnej.

Rozdział 7 Metoda lokalizacji pary kamer pracujących w różnych modalnościach (pasmo widzialne i termowizja) we wspólnym układzie współrzędnych- przedstawiono koncepcję fuzji multispektralnych danych 2D i danych 3D w systemie automatycznego monitorowania infrastruktury krytycznej za pomocą dronów. W rozdziale tym przedstawiono też autorski algorytm detekcji rozkalibrowania układu, a także algorytm korekcji mapowania obrazów w czasie rzeczywistym.

Rozdział 8 Podsumowanie - stanowi podsumowanie rozprawy, w którym stwierdzono że opracowane metody oraz algorytmy zostały z powodzeniem zaimplementowane do rzeczywistych rozwiązań. W rozdziale tym Autor wyznacza też kierunki dalszych prac.

Układ pracy, język oraz sposób prezentacji treści merytorycznych w niej zawartych jest zrozumiały. Ponadto stronę graficzną i edytorską należy ocenić bardzo dobrze.

3. Ocena przyjętej przez Autora koncepcji naukowej oraz sposobu jej realizacji

Łączenie danych 2D i 3D w celu obrazowania elementów geometrycznych opiera się, w dużej mierze, na dokładnym wyznaczeniu pozycji i orientacji kamery względem modelu 3D. Jest to kluczowe zagadnienie dzięki któremu można połączyć poszczególne chmury

punktów w całościowy trójwymiarowy obiekt. Wraz z rozwojem technologii dotyczące obrazowania możliwe stało się uzyskanie pomiarów 4D (3D + czas) o dużej rozdzielczości przestrzennej i czasowej.

Praca Pana mgr inż. Piotra Siekańskiego skupia się na rozwiązaniu tego problemu poprzez opracowanie nowych metod i algorytmów wyznaczania dokładnej pozycji kamery względem modelu. Przedstawione w niej zagadnienia zostały zaimplementowane z powodzeniem w rzeczywistym środowisku i w sposób empiryczny udowodniono ich skuteczność.

Analizując jednak opracowane przez Autora metody i ich możliwe wykorzystanie praktyczne, narzuciły recenzentce pewne kwestie polemiczne, które wymagają wyjaśnienia:

-czy w metodzie beznacznikowego wyznaczania pozycji kamery względem modelu w postaci chmury punktów niezależnie od metody użytej do jego pozyskania opisanej w rozdział 5, przeprowadzana została metrologiczna weryfikacja? Czy może Autor powiedzieć jaki jest błąd wskazania czy graniczny błąd dopuszczalny lub jak go można wyznaczyć, dla systemu powstałego na podstawie zaproponowanej w pracy metody?

-czy w systemie, powstałym przy użyciu zaproponowanej przez Autora metody wyznaczania względnej pozycji układu kamer w obecności zakłóceń w warunkach przemysłowych, wzorzec sześcienny był zwymiarowany na maszynie współrzędnościowej?

-czy norma ISO 5725-1:1994 (jest wersja polska nowsza z 2002 roku), która dotyczy tylko terminologii jest tutaj jedyną normą, którą można było wykorzystać, czy nie lepiej było przeprowadzić testy według np. normy ISO 10360-8?

-czy wzorzec do kalibracji multimodalnej układu kamer IR-VIS, został zwymiarowany?

-czy może Autor powiedzieć jaki jest błąd wskazania czy graniczny błąd dopuszczalny lub jak go można wyznaczyć, dla systemu powstałego na podstawie metody lokalizacji pary kamer pracujących w różnych modalnościach, opisanego w rozdziale 7?

-w jaki sposób można zagwarantować powiązanie z jednostką miar dla wszystkich trzech systemów?

Mimo wyrażonych przez recenzentkę wątpliwości wymagających wyjaśnienia praca doktorska Piotra Siekańskiego zasługuje na pozytywną ocenę, ponieważ:

- doktorant sformułował oryginalny problem badawczy polegający na opracowaniu metody lokalizacji kamery w złożonych warunkach środowiskowych na potrzeby analizy 3D.
- Opracował metodę beznacznikowego wyznaczania pozycji kamery względem modelu w postaci chmury punktów niezależnie od metody użytej do jego pozyskania, metodę wyznaczania względnej pozycji układu kamer w obecności zakłóceń w warunkach przemysłowych oraz Metodę lokalizacji pary kamer pracujących w różnych modalnościach (pasmo widzialne i termowizja) we wspólnym układzie współrzędnych.
- Opracował wykorzystanie obrazów ortograficznych zwanych ortofotomapami do wyznaczenia pozycji i orientacji kamery względem modelu używając powszechnie stosowanych algorytmów tzn. dopasowania deskryptorów pomiędzy obrazami ortograficznymi, a obrazem z kamery.
- Opracował wzorzec do kalibracji multimodalnej układu kamer
- Opracował metodę beznacznikowej korekcji złożenia obrazów multimodalnych w czasie rzeczywistym poprzez wyznaczanie piramid obrazów w obu modalnościach, a następnie detekcję krawędzi w obu obrazach za pomocą pochodnych kierunkowych.

- Zaimplementował opisane metody w realnych aplikacjach i przeprowadził testy poprawności ich działania.

Powyższe dokonania dowodzą, że Doktorant posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia prac badawczych oraz że rozwiązał postawiony w pracy doktorskiej problem badawczy i sformułował też kierunki dalszych badań nad rozwojem zaproponowanych metod.

Autor uznał bowiem że potrzebny jest dalszy rozwój metody lokalizacji kamer na podstawie modelu w postaci chmury punktów niezależnie od techniki jej rejestracji: w szczególności opracowanie procedur umożliwiających wykorzystanie danych z innych sensorów do wspomaganie procesu lokalizacji kamer takich jak czujniki inercyjne, a także wykorzystanie technik typu SLAM do lokalizacji kamer. Drugim polem do rozwoju będzie rozszerzenie opracowanego algorytmu kalibracji pary kamer IR-VIS oraz metody aktywnej korekcji mapowania danych o skaner typu LIDAR oraz opracowanie metody lokalizacji kamery zamontowanej na dronie na podstawie obrazu i modelu w postaci chmury punktów zarejestrowanej właśnie skanerem typu LIDAR. Kolejne pole do rozwoju Autor widzi w opracowaniu metody aktywnej korekcji kalibracji w wielokamerowych skanerach 3D, gdzie według Niego połączenie doświadczeń zebranych podczas kalibracji wielokamerowego skanera 3D do pomiaru kłód drewna z procedurami aktywnej korekcji mapowania obrazów może skutkować opracowaniem aktywnych metod detekcji i korekcji rozkalibrowania skanerów 3D i w ten sposób zapewnić większą odporność na niekorzystne czynniki środowiskowe. Zadania te powinny być zatem przedmiotem dalszych prac nad doskonaleniem proponowanych metod przez Autora.

4. Podsumowanie i wnioski końcowe

Recenzowana praca ma znaczną wartość poznawczą i praktyczną w dyscyplinie Inżynieria mechaniczna. Wnosi ważne treści do problematyki lokalizacji kamer na potrzeby analizy danych 3D. Na podstawie recenzowanej rozprawy mogę stwierdzić, że mgr inż. Piotr Siekański zaprezentował się jako dojrzały pracownik naukowy i jest w pełni przygotowany do pracy naukowo-badawczej. Doktorant wykazał się dużą wiedzą z zakresu metrologii współrzędnościowej 4D, a w szczególności obrazowania elementów wielkogabarytowych. Metody Autora zaimplementowano w rzeczywistych systemach obrazowania i z powodzeniem są one wykorzystywane w przemyśle, muzealnictwie i geodezji, co może świadczyć o multidyscyplinarności przedstawionych metod. Na wyróżnienie zasługuje też fakt, że wyniki pracy zostały opublikowane w postaci artykułów w czasopismach recenzowanych o zasięgu międzynarodowym: CATCHA: Real-Time Camera Tracking Method for Augmented Reality Applications in Cultural Heritage Interiors w czasopiśmie ISPRS International Journal of Geo-Information (IF 1.723), On-Line Laser Triangulation Scanner for Wood Logs Surface Geometry Measurement w czasopiśmie Sensors (IF 2.475), Online Correction of the Mutual Miscalibration of Multimodal VIS-IR Sensors and 3D Data on a UAV Platform for Surveillance Applications w czasopiśmie Remote Sensing (IF 4.118).

Podsumowując ocenę rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Siekańskiego pt.: „Metoda lokalizacji kamery w złożonych warunkach środowiskowych na potrzeby analizy danych 3D” stwierdzam, że:

- tematyka rozprawy kwalifikuje ją do dyscypliny naukowej Inżynieria mechaniczna,

- **praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim** zgodnie z art. 179 ust. 2 ustawy z dnia 3 lipca 2018 roku - Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669), w związku z art. 11 ust. 1, art. 14 ust. 1 pkt 1, ust. 2 pkt 1 oraz art. 20 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (tekst jednolity Dz. U. z 2017 r., poz. 1789 z późn. zm.) **i może być dopuszczona do publicznej obrony.**

*Ze względu na wyróżniające się publikacje oraz dojrzałość prac aplikacyjnych wnioskuję o **wyróżnienie pracy.***

Kraków 11.05.2022



dr hab. inż. Ksenia Ostrowska, prof. PK