

dr hab. inż. Marian Wysocki, prof. uczelni
Katedra Informatyki i Automatyki
Politechniki Rzeszowskiej

Rzeszów 20 sierpnia 2025r.

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia ...25.08.2025...

Zarejestrowano pod nr ...510-2.5/25...

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Bartosza Lentego
„Wykorzystanie optyki sterowalnej w obrazowaniu trójwymiarowym metodą SFF”

przygotowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne
Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie,
działającego na podstawie uchwały Rady Dyscypliny z dnia 3 lipca 2025.

PROBLEMATYKA PRACY

Wymieniona w tytule pracy metoda obrazowania trójwymiarowego SFF (Shape from Focus) opiera się na wykorzystaniu serii (stosu) obrazów wykonanych z różnymi ustawieniami ostrości. Dla każdego punktu sceny ocenia się ostrość w każdym obrazie i przyjmuje, że najbardziej ostry obraz tego punktu wskazuje na jego odległość od kamery. Pozwala to na iteracyjne wyznaczanie głębi i odtworzenie kształtu obiektu w przestrzeni 3D. Uzyskiwanie serii obrazów przy różnych ustawieniach ostrości polega najczęściej na sterowaniu układem optycznym za pomocą serwo mechanizmu krokowego lub na zmianie ogniskowej płynnej soczewki za pomocą pola elektrycznego. Do oceny ostrości wykorzystuje się różne metody przetwarzania obrazów 2D. W celu zapewnienia poprawnego odwzorowania głębokości i dokładności rekonstrukcji każdy z serii wykorzystywanych obrazów analizowany jest na podstawie wyników dokonanej uprzednio kalibracji polegającej na ustaleniu parametrów modelu pozwalającego dokładnie powiązać punkty na obrazach z ich rzeczywistymi położeniami w przestrzeni.

Tematyka pracy wiąże się ze szczegółowym rozwinięciem zasygnalizowanych wyżej elementów pod kątem modyfikacji, w części konstrukcyjnej i algorytmicznej, w celu rozszerzenia zakresu parametrów obrazowania metodą SFF. Łącząc zagadnienia przetwarzania obrazów cyfrowych i budowy układów wizyjnych dla potrzeb zautomatyzowanych przemysłowych systemów kontrolno-pomiarowych mieści się w obszarze dyscypliny **automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne**.

UKŁAD PRACY

Rozprawa licząca 175 stron składa się z jedenastu rozdziałów, bibliografii, załącznika oraz streszczeń w językach polskim i angielskim.

Rozdział 1 „Wstęp” zawiera krótkie wprowadzenie oraz sformułowanie celu, zakresu i tez pracy oraz zwięzły przegląd zawartości pracy.

Przedstawiono dwie tezy badawcze:

- I. *Zastosowanie optyki sterowalnej oraz autorskich algorytmów rekonstrukcji obrazu w metodzie SFF pozwala na zmianę sposobu rejestracji stosu obrazów 2D oraz pozwala na rekonstrukcję sceny 3D.*

II. *Wprowadzenie optyki sterowalnej do metody SFF pozwala na rozszerzenie zakresu parametrów obrazowania, co umożliwia rozszerzenie zakresu możliwych do realizacji zadań kontrolnych i pomiarowych.*

Rozdział 2 „*Obrazowanie w zadaniach automatyzacji*” jest wprowadzeniem do systemów wizyjnych 2D i 3D w zadaniach pomiaru i kontroli parametrów produktów na liniach przemysłowych.

Rozdział 3 „*Metody obrazowania 3D*” przedstawia metodę SFF w zestawieniu z innymi metodami obrazowania trójwymiarowego stosowanymi na liniach przemysłowych jak stereowizja, metoda Time of Flight, triangulacja laserowa.

Rozdział 4 „*Modyfikacja metody SFF*” wskazuje proponowane zmiany i zagadnienia badawcze związane z etapami procesu rekonstrukcji obrazu 3D.

Rozdział 5 „*Zastosowanie optyki sterowalnej w wizji maszynowej*” stanowi przegląd rozwiązań konstrukcyjnych obiektów, skupiając się na soczewkach płynnych i doborze soczewki dla potrzeb pracy.

Pięć kolejnych rozdziałów stanowi istotę pracy. Rozdział 6 „*Stanowisko badawcze*” zawiera szczegółowy opis zbudowanego przez Autora stanowiska. Omówiono układy mechaniczny, elektryczny i sterowania wraz z podzespołami, ich funkcjami i parametrami technicznymi. W rozdziale 7 „*Ocena ostrości na obrazie cyfrowym*” przedstawiono wyniki eksperymentów dotyczących wyboru estymatorów ostrości oraz algorytmów wyznaczenia płaszczyzny ostrej z uwzględnieniem wskaźników do porównania metod oceny ostrości. Przebadano wpływ tekstury powierzchni, rozmiaru jądra przekształcenia, kontrastu i geometrii oświetlenia. Rozdział 8 „*Transformacja obraz-świat*” omawia badania dotyczące kalibracji i otrzymane modele kalibracyjne. Szczegółowo przeanalizowano funkcję przejścia między lokalnym układem współrzędnych związanym z obrazem a układem współrzędnych stanowiska. Rozdział 9 „*Kompensacja błędów obrazowania*” przedstawia rozważania dotyczące identyfikacji czynników wpływających na jakość otrzymywanych obrazów 3D oraz propozycje algorytmów kompensacji. Rozdział 10 „*Weryfikacja metody obrazowania*” omawia przykłady praktycznego zastosowania metody SFF z zaproponowanymi modyfikacjami do obrazowania geometrii otworów kształtowych. Wyniki porównano z rezultatami uzyskanymi z użyciem triangulacji laserowej oraz skanera światła strukturalnego.

Opracowane w rozdziałach 6-10 rozwiązania pozwalają na kilkakrotne zwiększenie pola widzenia i rozdzielczości przestrzennych obrazowania metodą SFF. Zastosowana optyka sterowalna z soczewką płynną umożliwia integrację z dowolnym obiektywem stałogniskowym i sensorami stosowanymi w systemach wizyjnych, co pozwala na dostosowanie parametrów obrazowania do wymagań praktycznych a w konsekwencji na rozszerzenie zakresu zadań kontrolno-pomiarowych.

Pozostałą część rozprawy stanowi zwięzłe podsumowanie (rozdział 11) wskazujące najważniejsze osiągnięcia pracy i kierunki jej kontynuacji oraz wyczerpujący spis literatury obejmujący 142 reprezentatywne pozycje. Uzupełnienie stanowią: załącznik przedstawiający modele matematyczne estymatorów ostrości oraz umieszczony na początku pracy wykaz skrótów i oznaczeń.

OCENA PRACY

Praca dotyczy aktualnych i ważnych problemów trójwymiarowego obrazowania z wykorzystaniem metody SFF. Główne osiągnięcia Autora o nowatorskim charakterze polegają na:

1. Zaprojektowaniu, zbudowaniu i uruchomieniu stanowiska do pomiaru metodą SFF z wykorzystaniem optyki sterowalnej z soczewką płynną wykonaną w technice

- elastycznej membrany. W porównaniu do rozwiązania z układem napędowym takie podejście eliminuje zakłócenia w formie drgań mechanicznych, pozwalając dodatkowo na znaczne skrócenie czasu wygenerowania stosu obrazów.
2. Zaproponowaniu metody oceny typu i parametrów estymatorów ostrości stosu obrazów oraz metody ustalenia płaszczyzny ostrej dla punktu na podstawie estymacji ostrości, a także przeprowadzeniu badań nad doбором estymatorów z uwzględnieniem zakłóceń środowiskowych.
 3. Opracowaniu algorytmu filtracji wstępnej stosu obrazów 2D przed wyznaczaniem ostrości, poprawiającej jakość odwzorowania sceny trójwymiarowej.
 4. Opracowaniu i weryfikacji algorytmu kompensacji zakłóceń oraz wprowadzeniu korekty wpływu zmiany mocy skupiającej soczewki na powiększenie obrazu.
 5. Propozycji metody wyznaczania charakterystyki powiększenia oraz metody wyznaczania rzeczywistego położenia osi optycznej w sensorze.
 6. Ocenie wpływu aberracji optycznych.
 7. Weryfikacji metody obrazowania SFF w odniesieniu do geometrii otworów kształtowych w porównaniu z rezultatami uzyskanymi z użyciem triangulacji laserowej oraz skanera światła strukturalnego.

Przedstawione oryginalne rezultaty wzbogacają dotychczasową wiedzę w zakresie wykorzystania optyki sterowalnej w obrazowaniu trójwymiarowym metodą SFF.

Pan mgr inż. Bartosz Lenty osiągnął założony cel pracy związany z uzasadnieniem przedstawionych na wstępie tez, rozwiązując jasno postawione zagadnienie naukowe. Praca ma charakter teoretyczny i eksperymentalny, a wyniki eksperymentów zostały poprawnie opracowane. Autor biegle opanował niezbędne podstawy teoretyczne i pokazał umiejętność ich zastosowania do samodzielnego rozwiązywania zagadnień naukowych. Przedstawione w pracy nowe metody i wyniki eksperymentów mają wartości poznawcze oraz praktyczne znaczenie w obszarze zastosowania technik wizualizacji 3D z wykorzystaniem metody SFF. Były one przedmiotem publikacji Autora w *Applied Sciences*, *Wood. Research Papers. Reports. Announcements* i w materiałach konferencji publikowanych w *Proceedings of SPIE*. Praca jest ciekawa w sensie sformułowania i rozwiązania problemu. Została poprawnie skonstruowana i starannie zredagowana. Upoważnia to do stwierdzenia, że Autor opanował warsztat pisania rozpraw naukowych. Odnośniki literaturowe i wartościowe rozdziały 2-5 opisujące problematykę pracy w świetle studiów literaturowych wskazują zaś, że Autor posiada niezbędną orientację w bibliografii przedmiotu. Przedstawione dalej komentarze nie zmieniają mojej pozytywnej oceny pracy.

KOMENTARZE I PYTANIA

1. Praca jest staranna i poprawnie zredagowana. Można jednak dostrzec usterki edytorskie: literówki i przesunięcia marginesu, niepoprawne używanie apostrofu w odmianie niektórych nazwisk, brak odmiany jednostek wolty i ampery.
2. Autor nie wspomniał, jakie narzędzia obliczeniowe wykorzystywał do przetwarzania obrazów i kalibracji kamer.
3. Czy Autor rozważał przybliżanie wartości głębi metodą aproksymacji parabolicznej na podstawie wartości ostrości punktu w obrazach $k-1$, k , $k+1$ stosu, z maksimum ostrości uzyskanym na obrazie k ?
4. Zasygnalizowane w podsumowaniu kierunki dalszych badań uzupełniłbym o wykorzystanie nowoczesnych metod uczenia maszynowego, a przy tym wskazałbym na potrzebę gromadzenia obszernych zbiorów danych uczących jako podstawy do doskonalenia rozważanej metodyki.

PODSUMOWANIE

Praca doktorska Pana **mgr. inż. Bartosza Lentego** dotyczy ciekawego i aktualnego zagadnienia badawczego, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego o znaczeniu praktycznym z udokumentowanym aspektem nowości i **spełnia wymagania obowiązującej ustawy z dnia 20 lipca 2018 r.** Tematyka rozprawy mieści się w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Wnioskuje do Wysokiej Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie o przyjęcie pracy oraz dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę szeroki zakres badań, sporą praktyczną przydatność opracowanych rozwiązań oraz publikacje współautorskie w czasopismach (100 p. MNiSW): Applied Sciences (2), Wood. Research Papers. Reports. Announcements (1) proponuję rozważenie wyróżnienia pracy.

Stanisław Gopoch

dr hab. inż. Marian Wysocki, prof. PRz
Katedra Informatyki i Automatyki Politechniki Rzeszowskiej

Rzeszów 20 sierpnia 2025r.

Szanowny Pan
Dr hab. inż. Ryszard Sroka, prof. AGH
Przewodniczący Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne
Akademia Górniczo-Hutnicza
Im. Stanisława Staszica w Krakowie
Al. A. Mickiewicza 30,
30-059 Kraków

Szanowny Panie Profesorze,

Przesyłam recenzję rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Bartosza Lentego.

Z poważaniem

Marian Wysocki