

Białystok, 1.09.2025

dr hab. inż. Arkadiusz Mystkowski, prof. PB
Katedra Automatyki i Robotyki
Wydział Elektryczny
Politechnika Białostocka
a.mystkowski@pb.edu.pl

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEiTK

Wpłynęło dnia 08.09.2025
Zarejestrowano pod nr 510-2.6/25
Podpis 

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Bartosza Lenty

pt. „Wykorzystanie optyki sterowalnej w obrazowaniu trójwymiarowym metodą SFF”

Dyscyplina naukowa: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne

Promotor: dr hab. inż. Andrzej Sioma, prof. AGH

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Podstawą opracowania recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartosza Lenty było pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne dr hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH z dnia 8.07.2025 roku na podstawie uchwały nr 125/2025 ww. Rady z dnia 3.07.2025 roku.

1. Charakterystyka ogólna rozprawy

Rozprawa mgr inż. Bartosza Lenty mieści się w obszarze nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Praca dotyczy rozwoju metod obrazowania trójwymiarowego, w szczególności pasywnej metody Shape from Focus (SFF), poprzez zastosowanie optyki sterowalnej oraz autorskich algorytmów przetwarzania obrazu.

Autor stawia sobie za cel modyfikację toru optycznego metody SFF poprzez wykorzystanie soczewek płynnych oraz opracowanie zestawu algorytmów umożliwiających rekonstrukcję scen 3D w warunkach przemysłowych. Doktorant stawia dwie tezy, w których wykazuje, że:

Teza I – połączenie optyki sterowalnej z autorskimi algorytmami rekonstrukcji umożliwia zmianę sposobu rejestracji stosu obrazów 2D oraz rekonstrukcję sceny 3D.

Teza II – wprowadzenie optyki sterowalnej rozszerza parametry obrazowania, co zwiększa klasę możliwych zadań kontrolno-pomiarowych.

Praca dotyczy istotnego i aktualnego problemu badawczego, a jej interdyscyplinarny charakter łączy zagadnienia z zakresu optyki, automatyki/automatyzacji, przetwarzania obrazu i metrologii. Rozprawa jest monografią obejmującą 11 rozdziałów (ponad 170 stron głównej treści), zawiera streszczenie w języku polskim i angielskim, bogaty przegląd literatury, opis konstrukcji stanowiska badawczego, szczegółowe wyniki badań eksperymentalnych oraz propozycje algorytmów kompensacyjnych wraz z załącznikiem z modelem matematycznym estymatorów, co spełnia standardy formalne pracy doktorskiej w dyscyplinie AEEiTK. Spis treści pracy wskazuje na logiczny układ: wstęp (cele, tezy, plan), przegląd obrazowania 2D/3D,

propozycję modyfikacji SFF, zastosowanie optyki sterowalnej, stanowisko badawcze, kalibrację, kompensację błędów, weryfikację i wnioski.

2. Ocena merytoryczna

2.1. Nowość i oryginalność

Tematyka pracy wpisuje się w aktualne trendy automatyzacji i cyfryzacji procesów przemysłowych, a proponowana modyfikacja metody SFF ma wysoki potencjał aplikacyjny przekładający się na rozwój systemów wizyjnych.

Najważniejszym osiągnięciem autora jest wprowadzenie soczewek płynnych do metody SFF i ich eksperymentalna weryfikacja. Dotychczas metoda ta rozwijana była głównie w kontekście mikroskopii lub pomiarów laboratoryjnych, natomiast autor koncentruje się na przesunięciu jej w stronę przemysłowych zastosowań kontrolno-pomiarowych. W szczególności najważniejszym wkładem autora jest integracja soczewki o ogniskowej zmienianej elektrycznie z procesem akwizycji dla SFF oraz łańcuch algorytmiczny obejmujący: dobór/analizę estymatorów ostrości, algorytm selekcji płaszczyzny ostrej (m.in. wykrywanie i interpolacja wierzchołków krzywych ostrości), wprowadzenie mapy ufności oraz procedury kalibracji i kompensacji błędów (m.in. zmiany powiększenia przy pracy soczewki ciekłej). W tym aspekcie praca wykazuje spójny zestaw innowacji ukierunkowanych na potencjalne wdrożenie przemysłowe.

Oryginalnym wkładem autora jest:

- zaprojektowanie i uruchomienie stanowiska badawczego z soczewką płynną,
- identyfikacja wpływu parametrów pracy soczewki na jakość rekonstrukcji 3D,
- opracowanie dwóch głównych autorskich algorytmów kompensacji błędów (aberracji optycznych, zmiany powiększenia, fluktuacji oświetlenia),
- propozycja mapy ufności dla oceny jakości rekonstrukcji.

2.2. Poprawność metodologiczna

Autor przeprowadził kompleksowy cykl badań: od analizy literatury, poprzez projekt stanowiska, implementację algorytmów, aż po testy eksperymentalne na różnych materiałach (stal, drewno, tworzywa sztuczne). Doktorant przedstawia szeroki przegląd metod obrazowania 3D (stereowizja, ToF, triangulacja laserowa, SFF) i ich zastosowań w kontroli jakości, uwzględniając zarówno pozycje klasyczne, jak i aktualne wyniki (2021–2024). W bibliografii pojawiają się m.in. prace dotyczące estymatorów ostrości i miary wiarygodności SFF (Pertuz i in.), nowe algorytmy SFF, a także współautorskie publikacje kandydata (SPIE, *Applied Sciences* 2024), co świadczy o aktualności i aktywności naukowej w temacie. Opisy są jednak miejscami nadmiernie rozbudowane i encyklopedyczne. Warto byłoby w większym stopniu akcentować krytyczne porównania i wskazywać na wyraźne luki badawcze.

W pracy autor nie ogranicza się wyłącznie do modyfikacji sprzętowej – podejmuje również próbę opracowania algorytmów kompensacyjnych i kalibracyjnych, co świadczy o holistycznym ujęciu problemu. Zastosowane zostały dwa główne typy algorytmów kompensacji błędów:

- 1) Kompensacja zmiany powiększenia obrazu wynikającej z użycia soczewki ciekłej
 - Zmiana ogniskowej soczewki sterowalnej powoduje, że ten sam obiekt przy różnych ustawieniach ostrości ma różne powiększenie.

- Autor przygotował procedurę kompensacji skalowania: wykorzystał analizę geometryczną wraz z kalibracją obiektu wzorcowego, aby przeliczyć współrzędne obrazu do jednolitego układu odniesienia. Dzięki temu kolejne obrazy stosu SFF mogą być poprawnie zestawiane, bez błędów wynikających z deformacji metrycznej.
- 2) Kompensacja błędów wynikających z deformacji i aberracji optycznych
- Autor uwzględnił, że soczewki ciekłe wprowadzają nieliniowe zniekształcenia i aberracje sferyczne, nasilające się przy dużych zmianach ogniskowej.
 - W pracy opisano korekcję opartą na procedurach kalibracyjnych i dopasowaniu odwzorowania transformacją geometryczną (przekształcenie do układu świata), co pozwala ograniczyć błędy pomiaru wysokości w rekonstrukcji 3D.

Reasumując, zastosowano poprawne metody analizy jakości obrazowania (m.in. porównanie estymatorów ostrości, algorytmów selekcji płaszczyzny ostrej, wskaźniki RMSE). Wyniki prezentowane są w formie tabel, wykresów i chmur punktów.

Najważniejsze zauważalne ograniczenia metodologiczne to:

- przeprowadzona walidacja ma tylko charakter demonstracyjny, brak pełnej walidacji w środowisku przemysłowym np. w warunkach rzeczywistych linii produkcyjnych,
- wąski zakres porównań z metodami konkurencyjnymi (stereowizja, triangulacja laserowa, światło strukturalne), dodatkowo porównania dotyczą tylko jednego zadania tj. geometrii otworów,
- ograniczony dobór materiałów testowych – przydałoby się uwzględnienie obiektów typowych dla automatyzacji przemysłu o wysokiej refleksyjności czy przezroczystych.

2.3. Część teoretyczna

Autor przedstawił proponowane zmiany składające się na modyfikację metody SFF, które zostały skorelowane z etapami procesu rekonstrukcji obrazu trójwymiarowego w metodzie SFF. W rozdziale 4 pt. „Modyfikacja metody SFF” uporządkowano proces: rejestracja stosu obrazów, estymacja ostrości, porównanie wartości estymatora ostrości, budowa mapy wysokości i konwersja do chmury punktów. Zamyśl jest poprawny: autor zaczyna od jakości sygnału (dobór funkcji ostrości), przechodzi do wiarygodności/odporności (mapa ufności), a kończy na rekonstrukcji 3D.

Doktorant uzasadnia celowość zastosowania optyki sterowalnej w maszynowych systemach wizyjnych tzw. „wizji maszynowej”. W rozdziale 5 pt. „Zastosowanie optyki sterowalnej w wizji maszynowej” autor uzasadnia wybór soczewek ciekłych na tle innych wariantów optyki zmiennoogniskowej (w tym rozwiązania MEMS, SMA, napędy zewnętrzne), co wspiera część konstrukcyjną tezy.

2.4. Część eksperymentalna

W rozdziale 6 przedstawiono stanowisko badawcze z kamerą, oświetleniem (LED), filtracją polaryzacyjną, wymienną optyką i elementami do równomiernego tła, co odpowiada realiom przemysłowym i ogranicza odblaski oraz flary. Przedstawiony opis stanowiska badawczego zawiera widoki ogólne oraz schematy układu optycznego i układu sterowania. Nie zawarto rysunków konstrukcyjnych oraz brakuje uzasadnienia doboru elementów napędowych, pomiarowych i sterowania. Brakuje także informacji, które elementy składające się na projekt i budowę stanowiska badawczego są indywidualnym wkładem autora. Prezentacja wyników jest

rzetelna, chociaż w niektórych miejscach (np. analiza wpływu geometrii oświetlenia, aberracji optycznych) brakuje bardziej syntetycznych uogólnień i wskazania praktycznych rekomendacji dla warunków przemysłowych. Weryfikacja na obiekcie „otwór kształtowy” wydaje się trafnym przypadkiem metrologicznym (krawędzie, strome gradienty, okluzje), a zestawienie wyników SFF z triangulacją laserową i stereowizją ze światłem strukturalnym pozwala porównać zalety/ograniczenia podejść. Jest to wartość praktyczna dla oceny gotowości wdrożeniowej.

2.5. Część algorytmiczna

Autor opracował i zaimplementował szereg algorytmów oceny ostrości, kalibracji oraz kompensacji błędów. Wykorzystanie mapy ufności do poprawy jakości rekonstrukcji należy uznać za ciekawy i oryginalny pomysł. W tej części praca posiada największą wartość dodaną. W rozdziale 8 pt. „Transformacja obraz–świat” wprowadzono transformację pomiędzy współrzędnymi lokalnymi (związanymi z obrazem) do współrzędnych globalnych (stanowiska badawczego) oraz krzywe kalibracyjne – kluczowe dla przejścia z map „wysokości względnej” do metrologicznie interpretowalnych wymiarów. W rozdziale 9 pt. „Kompensacja błędów obrazowania” przedstawiono metody kompensacji zmiany powiększenia (typowy skutek zmiany ogniskowej soczewki ciekłej) oraz skutków zniekształceń/aberracji. Jest to niezwykle istotne, ponieważ brak kompensacji SFF dla sterowalnej optyki generuje deformacje metryczne. Na uwagę zasługuje fakt uwzględnienia mapy ufności i kryteriów odrzutu.

3. Uwagi krytyczne i szczegółowe

Chociaż autor wskazuje na modyfikację metody SFF, nie precyzuje wystarczająco, na czym polega istotowy wkład naukowy w stosunku do istniejących rozwiązań. Brak wyraźnego odniesienia do najnowszych publikacji (poza 2020 rokiem) osłabia argumentację o nowatorskim charakterze pracy. W szczególności główne uwagi krytyczne są następujące:

- 1) Brak walidacji systemu w rzeczywistych warunkach przemysłowych pracy systemów wizyjnych w systemach np. linii produkcyjnych, gdzie występują drgania, zakłócenia elektromagnetyczne, duża zmienność oświetlenia, itd. Przedstawione przykłady weryfikacji są laboratoryjne.
- 2) Brak porównania z komercyjnymi systemami 3D pod kątem dokładności, prędkości działania i odporności na warunki przemysłowe.
- 3) Doktorant wybrał soczewki z elastyczną membraną, ale nie przeprowadził wystarczająco głębokiej analizy ich wad w kontekście długoterminowej stabilności, wpływu temperatury, starzenia się membrany czy powtarzalności nastaw.
- 4) Postawione tezy badawcze nie znajdują w pełni przekonującego potwierdzenia w wynikach. Np. teza II mówi o „rozszerzeniu zakresu parametrów obrazowania”, ale nie pokazano, w jakim stopniu jest to osiągnięte w porównaniu z klasyczną SFF lub innymi metodami 3D.
- 5) Autor nie dyskutuje, dlaczego akurat SFF z optyką sterowalną ma być lepszym rozwiązaniem niż inne metody 3D (np. skanery strukturalne, ToF) w kontekście przemysłowym.
- 6) Dyplomant wskazuje wprost, że „wąskim gardłem” konfiguracji jest transmisja z kamery, co prowadzi do czasów rzędu „kilkudziesięciu sekund”. To ogranicza zastosowania on-line oraz w systemach pracujących w czasie rzeczywistym, (np. ROI, szybszy interfejs, redukcja rozdzielczości, kompresja, akwizycja ciągła).
- 7) W rozdziale 9 zawarto kompensację powiększenia, ale brakuje skondensowanego zestawienia „przed/po”: maks. błąd, RMS, rozkłady reszt, czułość na defocus, przy różnych aperturach soczewki, aby ilościowo wykazać zysk metrologiczny.

- 8) Brakuje studium przypadków dla materiałów matowo-ciemnych i wysoko refleksyjnych (lakier, metal polerowany), z inną polaryzacją/światłem strukturalnym. Takie materiały są często spotykane w systemach produkcyjnych.
- 9) Brakuje pełnego porównania metod i ich analizy w odniesieniu do konkurencyjnych technik obrazowania 3D. Na przykład, zestawienie z triangulacją czy stereowizją powinno być pogłębione o wskaźniki czasowe, kosztowe i odpornościowe.
- 10) Ujęcie aplikacyjne – brakuje konkretnego studium przypadku wdrożeniowego, które pokazałoby realną przewagę proponowanej metody.

Uwagi szczegółowe i redakcyjne

- 1) Styl i język – tekst jest poprawny językowo, ale miejscami zbyt opisowy; w rozdziałach teoretycznych zdarzają się powtórzenia.
- 2) Bibliografia – obszerna (ponad 140 pozycji), ale w dużej części oparta na źródłach podręcznikowych i raportach technicznych; można by mocniej zaakcentować najnowsze artykuły z czasopism wysokiego IF. Są tam też błędy formatowania.
- 3) Część rysunków i schematów jest zbyt pogładowa i nie wnosi wartości dodanej (np. schematy podstaw optyki, str. 74).
- 4) Brakuje zestawienia zbiorczego parametrów systemu (kamera, optyka, zakres z, FOV, rozdzielczość lateralna/osiowa, czasy akwizycji i przetwarzania) w jednej tabeli, dla scen z rozdz. 10.
- 5) Brakuje tzw. „wytycznych wdrożeniowych” (oświetlenie, polaryzacja, konserwacja soczewki ciekłej, kontrola temperatury).
- 6) Niefortunnie sformułowany tytuł rozdziału 8 pt. „Transformacja obraz-świat”.
- 7) W j. polskim separatorem wartości dziesiętnych jest przecinek, natomiast autor stosuje kropkę dla wartości liczbowych w tekście i tabelach.
- 8) Używanie nieinżynierskich określeń np. „najgorszy”, „najlepszy”, „mały”, zamiast odnosić się do konkretnych wartości.

4. Ocena formalna

Rozprawa doktorska mgr. inż. Bartosza Lenty stanowi ambitną próbę modyfikacji metody Shape from Focus (SFF) poprzez wprowadzenie optyki sterowalnej, w szczególności soczewek płynnych, w celu poprawy parametrów użytkowych systemów wizyjnych stosowanych w przemyśle. Praca dotyczy istotnego i aktualnego problemu badawczego, a jej interdyscyplinarny charakter łączy zagadnienia z zakresu optyki, automatyki, przetwarzania obrazu i metrologii. Mimo niewątpliwych zalet, takich jak szczegółowy przegląd literatury, starannie zaprojektowane stanowisko badawcze oraz obszerny materiał empiryczny, praca zawiera również błędy, które nie wpływają znacząco na jej wartość naukową i aplikacyjną. Rozprawa jest starannie przygotowana od strony edytorskiej, ma przejrzystą strukturę i logiczny układ rozdziałów. Język pracy jest poprawny, terminologia stosowana konsekwentnie. Cytowania i bibliografia są zgodne z normą akademicką.

5. Wniosek końcowy

Rozprawa mgr inż. Bartosza Lenty stanowi wartościowy i oryginalny wkład w rozwój metod obrazowania trójwymiarowego. Autor opracował i przebadął nową konfigurację metody SFF z użyciem optyki sterowalnej, zaproponował własne algorytmy kompensacyjne oraz

udokumentował ich skuteczność w badaniach eksperymentalnych. Doktorant wykazał się wiedzą i umiejętnościami samodzielnego rozwiązywania problemów naukowych wnoszących znaczący wkład w rozwój dyscypliny naukowej AEEiTK. Mimo pewnych niedostatków w zakresie walidacji przemysłowej i porównania z innymi metodami, dorobek autora spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych.

Podsumowując, przedłożona rozprawa:

- odpowiada aktualnym wyzwaniom i problemom automatyzacji kontroli jakości,
- zawiera oryginalne wyniki w zakresie integracji optyki sterowalnej z SFF oraz procedur kalibracji/kompensacji,
- jest poprawna metodologicznie i rzetelna eksperymentalnie, przy jasno określonych ograniczeniach i perspektywach rozwoju (m.in. światło strukturalne, skrócenie czasu akwizycji, itp.).

Wniosek

Opiniowana praca Pana mgr inż. Bartosza Lenty spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w rozumieniu Ustawy z dnia 20.07.2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. 2023 poz. 742) art. 187 ust. 1 i ust. 2. Wnioskuje zatem do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie o dopuszczenie mgr. inż. Bartosza Lenty do publicznej obrony rozprawy.

Jednocześnie z uwagi na spełnienie kryteriów wyróżniania rozpraw doktorskich w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, określone Uchwałą nr 83/2025, stawiam wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartosza Lenty.

Decyzję uzasadniam tym, iż opiniowana rozprawa przedstawia nowatorskie i kompleksowe połączenie metody SFF z optyką sterowalną (soczewką ciekłą) oraz autorski zestaw algorytmów poprawiających dokładność i odporność metody SFF. Aspekty te wnoszą znaczący wkład w rozwój systemów wizyjnych o zastosowaniu przemysłowym. Jednocześnie aktywność publikacyjna Doktoranta jest znacząca, gdyż posiada autorskie i współautorskie publikacje naukowe o zasięgu międzynarodowym, które bezpośrednio rozwijają elementy przedstawione w rozprawie (np. dobór estymatorów ostrości), między innymi:

- publikacje współautorskie w czasopismach (m.in. *Applied Sciences*), 4 pozycje,
- publikacje współautorskie w czasopismach w materiałach konferencyjnych,
- sumarycznie 9 pozycji wg. bazy WoS, liczba wszystkich cytowań = 40, index Hirscha = 4 (wg. bazy WoS na dzień 1.09.2025).

dr hab. inż. Arkadiusz Mystkowski, prof. PB