

Wrocław 05.09.2025

dr hab. inż. Jacek Reiner, profesor uczelni
Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczny
Katedra Zaawansowanych Technik Wytwarzania
Wyb. S. Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
jacek.reiner@pwr.edu.pl

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 10.09.2025

Zarejestrowano pod nr 510-2.7/25

Podpis 

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Bartosza Lenty

pt.: „Integracja optyki sterowalnej do obrazowania 3D metodą SFF”
(Integration of Controllable Optics into 3D Imaging via the SFF Method)

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Bartosza Lenty pt.: „Integracja optyki sterowalnej do obrazowania 3D metodą SFF” (Integration of Controllable Optics into 3D Imaging via the SFF Method), zrealizowana pod kierunkiem dr hab. inż. Andrzeja Siomy, profesora AGH. Recenzja została opracowana w odpowiedzi na pismo (RD AEEITK/510-2-3/2) Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, Akademii Górniczo Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, dr hab. inż. Ryszarda Srokę, profesora AGH.

1. Obszar problemowy rozprawy

Systemy wizyjnej kontroli jakości są obecnie typowym wyposażeniem technologicznym nowoczesnych systemów wytwórczych. Nie oznacza to bynajmniej, że wszystkie problemy jakościowe są z sukcesem rozwiązywane za ich pomocą. Obszarem wymagającym jeszcze badań i rozwoju jest np. inspekcja 3D. Tutaj szereg opracowań naukowych i aplikacyjnych, dla metody triangulacji laserowej, przedstawił prof. Andrzej Sioma, wskazując również na ograniczenia tego podejścia. Stąd, podjęcie prac nad inną metodą obrazowania 3D - SSF (Shape From Focus) – rekonstrukcja z ostrości (zwana również metodą ogniskowania), przez doktoranta mgr inż. Bartosza Lenty, uważam za doskonały przykład efektywnego rozwijania kompetencji naukowych zespołu w zakresie przemysłowej wizji maszynowej.

Dotychczas bowiem, metoda SFF, nie znalazła szerokiego zastosowania przemysłowego, m.in. z uwagi na ograniczoną wydajność wynikającą ze zmechanizowanego, czasochłonnego skanowania, stąd podatności na zakłócenia, oraz ograniczonego zakresu skanowania wysokości. Doktorant, zaproponował istotną modyfikację tej metody polegającą na użyciu sterowalnego układu optycznego – soczewki płynowej (VARIO).

Wprawdzie, soczewki o zmiennej geometrii są znane, jednakże ich integracja z torami optycznymi systemów wizyjnych skutkuje również koniecznością radykalnych modyfikacji w zakresie algorytmów przetwarzania obrazów. Chodzi tu głównie o zmianę powiększenia, zatem i pola widzenia wynikającego ze zmiany mocy optycznej. Inne istotne pytania badawcze



dotyczą aberracji optycznych, liniowości, kalibracji czy odporności takiego układu na zakłócenia przemysłowe.

W takim kontekście wyzwanie badawcze pt. „Integracja optyki sterowalnej do obrazowania 3D metodą SFF” podjęte przez mgr inż. Bartosza Lenty jako temat pracy doktorskiej uważam za naukowo uzasadnione, gospodarczo ważne i ambitne.

Badania prowadzone w tym zakresie wymagają interdyscyplinarnej wiedzy i umiejętności optomechatronicznych ze szczególnym rozumieniem aspektów przetwarzania i analizy danych przestrzennych, stąd tematyka tej pracy mieści się w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

2. Kompozycja i treść rozprawy

Dysertacja obejmuje 175 stron, podzielona jest na 11 rozdziałów i załącznik. Na początku pracy znajdujemy Streszczenie i anglojęzyczny Abstract oraz wykaz najważniejszych pojęć i skrótów.

We „**Wstępie**” Autor przedstawia motywację do podjęcia swojej pracy badawczej, wskazując na specyficzne wymagania i zakłócenia oddziałujące na systemy wizyjne w warunkach przemysłowych.

Na podstawie powyższych wniosków, został sformułowany nadrzędny cel pracy jako, **modyfikacja metody obrazowania trójwymiarowego SFF w zakresie zmiany sposobu rejestracji stosu obrazów oraz uwzględnienia tej zmiany w algorytmach rekonstrukcji obrazów trójwymiarowych, co ma poprawić parametry obrazowania w warunkach przemysłowych.**

Na podstawie powyższego, określono zakres pracy, obejmujący badania i rozwój zarówno toru optycznego oraz algorytmów przetwarzania obrazów.

Autor sformułował również dwie **tezy badawcze**:

„Zastosowanie optyki sterowalnej oraz autorskich algorytmów rekonstrukcji obrazów w metodzie SF pozwala na zmianę sposobu rejestracji stosu obrazów 2D oraz pozwala na rekonstrukcję sceny 3D.”

„Wprowadzenie optyki sterowalnej do metody SFF pozwala na rozszerzenie zakresu parametrów obrazowania co umożliwia rozszerzenie zakresu możliwych do realizacji zadań kontrolnych.”

Następnie szczegółowo omówiono strukturę pracy z opisem zawartości poszczególnych rozdziałów.

Rozdział 2, zatytułowany „**Obrazowanie w systemach automatyzacji**” zawiera opis najważniejszych zagadnień dotyczących akwizycji obrazów. Autor rozpoczyna od charakterystyki fal elektromagnetycznych w dziedzinie spektralnej wskazując na VIS jako zakres pracy. Następnie omawia najważniejsze parametry optyczne systemów wizyjnych: ogniskowa, rozdzielczość, rozmiar piksela i sensora, apertura, pole widzenia, minimalna odległość ogniskowania głębia ostrości. Dalej znajdujemy omówienie różnych reprezentacji modelu 3D: stos obrazów 2D, mapa głębi, chmura punktów, siatka, woksele.

W rozdziale 3 pt. „**Metody obrazowania 3D**”, szczegółowo omówiono stereowizję, światło strukturalne, metodę pomiaru czasu propagacji (ToF), triangulację laserową oraz metodę SFF z pogłębioną analizą prac naukowych z tego zakresu. Wnioski Autora z przeglądu stanu wiedzy w pełni potwierdzają postawione na wstępie założenia:

- dotychczasowe rozwiązania cechuje niewielki obszar obrazowania (kilka milimetrów),
- pożądane jest zwiększenie zakresu XY oraz Z,
- istotnym czynnikiem jest czas akwizycji,
- zakłócenia przemysłowe w postaci drgań i wibracji muszą być uwzględnione.

Rozdział 4, pt. „**Modyfikacja metody SFF**”, to rozdział opisujący autorski program badań. Na tle architektury i funkcji poszczególnych komponentów systemu akwizycji SFF wskazano, omówiono i uzasadniono zadania badawcze. Dla przejrzystości prezentacji Autor wprowadził kodowanie poszczególnych zadań, identyfikując 9 wyzwań zgrupowanych w 6 klas. Na uznanie zasługuje takie metodyczne zaplanowanie i przedstawienie ich w postaci graficznej i tabelarycznej.

W Rozdziale 5 pt. „**Zastosowanie optyki sterowalnej w wizji maszynowej**” tutaj omówiono obiektywy stałogniskowe, zmiennoogniskowe zmechanizowane oraz obiektywy o zmiennej ogniskowej (VARIO) – będące istotą zainteresowań tej pracy. Na podstawie szczegółowej analizy soczewek z elastyczną membraną i soczewek w technologii electrowetting – Autor ocenił i uzasadnił wybór obiektywu membranowego do dalszych badań.

W rozdziale 6 przedstawiono opracowane „**Stanowisko badawcze**”. Na wstępie założenia konstrukcyjne, a dalej omówiono projekt mechaniczny stanowiska umożliwiającego ruchy XYZ w zakresach 250x400x300mm z rozdzielczością 0,01mm. Model stanowiska opracowano w środowisku CAD. Projekt układu sterowania bazuje na sterowniku PLC oraz panelu HMI, zadbane w nim również o aspekty bezpieczeństwa. Sterowanie oferuje 3 tryby pracy: JOG, manualny i synchroniczny. Sterowanie nadrzędne i przetwarzanie obrazów realizowane jest na komputerze PC z komunikacją GigeVision (kamera) i UART (VARIO). Projekt systemu akwizycji bazuje na kamerze Dalsa Nano M2950 z sensorem On-Semi Python5000 P1 (5.1Mpix, global shutter, 4,8um, 1”, 51,8fps), obiektywie Fujinon HF50XA-5M (f=500mm, f/2,4, MOD 200mm) i soczewce sterowalnej OptoTune EL-16-40-TC (apertura 16mm, +/-3D).

Rozdział 7, „**Ocena ostrości na obrazie cyfrowym**” to obszerna część badań własnych przedstawiająca wyniki badań algorytmów przetwarzania obrazów, dla różnych zestawów danych obrazowych.

Na wstępie znajdujemy obszerny przegląd estymatorów, oceny ostrości na obrazie, podsumowany zestawieniem tabelarycznym 18 różnych rozwiązań. Dalej zaprezentowano autorską metodę porównania estymatorów, dla różnych rodzajów powierzchni (metal, tworzywo sztuczne, drewno) o różnej SGP ($R_a = 0,5; 5,9; 22,5 \mu m$) i różnych oświetlaczy (kopułkowy, pierścieniowy, liniowy). W zakresie metod wyboru ostrości wybrano funkcję maksimum (MAX) oraz metodę środka ciężkości (CoG) i opracowano dwa kryteria oceny: błąd średniokwadratowy (RMSE) oraz bezwzględny błąd dopasowania (AFE). Wiarygodność badań wspierana jest z 6-krotnymi ich powtórzeniami.

W zakresie omawianych wyników znajdujemy: badanie algorytmów selekcji płaszczyzny ostrości, wpływ tekstury powierzchni, wpływ rozmiaru jądra przekształcenia, wpływ kontrastu oraz wpływ geometrii oświetlacza.

Rozdział 8 zatytułowano „**Transformacja obraz – świat**”. Omówiono tu wyniki badań nad funkcją przejścia między lokalnymi układami współrzędnych obrazów a układem współrzędnym stanowiska. Badania w tym zakresie są fundamentalne, gdyż rozwiązują problem zmiennego powiększenia obrazów, więc i pola widzenia, wynikający z zastosowania zaobiektywowego soczewki VARIO.

W rozdziale 9 omówiono zagadnienie „**Kompensacji błędów obrazowania**”. Autor omówił oryginalną metodę wyznaczania i kompensacji zmiennego powiększenia. W tym celu opracował dedykowany wzorec, a dzięki metodzie wyznaczania środka ciężkości, nawet

rozmytych obrazów, wykazał, że możliwe jest wyznaczanie ich przesunięcia niezależnie od stopnia rozmycia. Opracowany algorytm został zweryfikowany na przykładzie wzorca schodkowego.

Kolejny z omawianych problemów dotyczy aberracji optycznych – szczególnie dystorsji. Na podstawie analizy błędów reprojekcji na bazie wyestymowanego modelu kamery z wielomianowym modelem dystorsji, stwierdzono, że błędy wprowadzane przez soczewkę VARIO są pomijalne dla ponad 95% zakresu pomiarowego. Potwierdzono ponadto, że nie występuje zmiana jasności obrazów, jak ma to miejsce w klasycznej metodzie SFF.

Bardzo istotnym wkładem Autora jest również rozszerzenie algorytmu o wyznaczanie map ufności, które służą do filtracji danych. W ten sposób poprawiana jest odporność rozwiązania na zakłócenia i jednocześnie poprawiana jest wiarygodność metrologiczna systemu.

Rozdział 10 „**Weryfikacja metody obrazowania**” przedstawia wyniki oceny porównawczej opracowanej metody SFF-vario z metodą triangulacji laserowej (SICK Trispector 1030) oraz z metodą światła strukturalnego (Photoneo PhoXi 3D Scanner S).

Badania porównawcze przeprowadzono na specjalnie zaprojektowanym obiekcie testowym zawierającym różnej średnicy otwory walcowe, stożkowe i stopniowe oraz stożki i stopnie. Obiekt testowy wykonano z materiału Necuron, co wyeliminowało problematykę odbić lustrzanych.

Uzyskane wyniki jednoznacznie potwierdziły przewagę opracowanej metody obrazowania w kontekście minimalizacji okluzji, dla większości przypadków zaobserwowano aż 10 krotną poprawę.

Rozdział 11 to „**Podsumowanie**” przeprowadzonych badań, wnioski i kierunki dalszych badań. Stwierdzono, że postawione tezy zostały potwierdzone otrzymanymi wynikami. Opracowana metoda SFF-vario, jest szybsza i odporna na zakłócenia przemysłowe. Możliwa jest integracja z dowolnymi obiektami stałooogniskowymi i sensorami stosowanymi w systemach wizyjnych. Dalszy potencjał poprawy wydajności związany jest z interfejsem komunikacyjnym kamery.

Bibliografia obejmuje 142 pozycje, aktualne, głównie anglojęzyczne.

Załącznik do dysertacji zawiera „**Model matematyczny estymatorów**”, które były przedmiotem badań w pracy.

Redakcja pracy jest bardzo staranna, kompozycja rozdziałów, przypisy i odsyłacze nie budzą zastrzeżeń. Praca jest napisana dobrym językiem, bez błędów stylistycznych czy redakcyjnych. Forma graficzna i edycyjna są na wysokim poziomie.

3. Ocena celu pracy, tezy i zakresu

Autor jasno i trafnie formułuje cel pracy doktorskiej jako **Modyfikacja metody obrazowania trójwymiarowego SFF w zakresie zmiany sposobu rejestracji stosu obrazów wraz z uwzględnieniem algorytmów rekonstrukcji obrazów trójwymiarowych.**

Opracowana metoda skanowania 3D ma na celu poprawę parametrów obrazowania i umożliwienie jej zastosowania w przemysłowych systemach kontrolno-pomiarowych.

Autor postuluje, że zastosowanie optyki sterowalnej (VARIO) pozwoli wyeliminować z toru optycznego napędy elektryczne, co skróci czas akwizycji, uodporni system na zakłócenia przemysłowe, a nawet rozszerzy zakres skanowania. Badania będzie prowadził na opracowanym stanowisku badawczym wraz z autorskimi algorytmami przetwarzania obrazów. Przedmiotem badań będą trzy różne powierzchnie różnych materiałów oraz opracowany

wzorzec z różnymi kształtami i średnicami otworów.

Na wyróżnienie zasługuje opracowany bardzo szczegółowy plan i schemat prac badawczych.

4. Ocena metod badawczych

Niniejsza praca doktorska dowodzi bardzo dobrego opanowania przez Autora zastosowania metod i narzędzi naukowych w pracach badawczych, tj.

- Analiza stanu wiedzy - studium literaturowe.
Autor przeprowadził pogłębione analizy w zakresie najistotniejszych prac i wyników związanych z metodą SFF obrazowania, algorytmów i aplikacji, na ich podstawie sformułował istotne wnioski dla realizacji badań.
- Sformułowanie celu badawczo-rozwojowego, ograniczeń i celów szczegółowych
Sformułowany cel badawczy, zaproponowany sposób rozwiązania są poprawne i ambitne. Jego dekompozycja na zadania szczegółowe, forma opisu i prezentacji na diagramie jest bardzo komunikatywna i poprawna merytorycznie. Zakres planowanych badań jest obszerny i wymaga interdyscyplinarnej wiedzy.
- Pogłębienie podstaw teoretycznych do rozwijanych zagadnień przetwarzania danych pomiarowych.
Jest ściśle związane z obszarem badań, stąd dotyczy metod obrazowania SFF, sterowalnych układów optycznych, algorytmów przetwarzania obrazów: wy
- Opracowanie dedykowanego stanowiska/aparatury badawczej
Opracowane stanowisko badawcze integruje część mechaniczną, sterowania i tor optyczny akwizycji obrazów 3D. Jest zaprojektowane zgodnie z obowiązującymi standardami i w użyciu najnowszych narzędzi projektowych. Wykonane jest na najwyższym poziomie technicznym.
- Opracowanie i przebadanie algorytmów
Opracowane i zaimplementowane algorytmy dotyczą sterowania układem pozycjonowania pozycji, sterowanie soczewką zmiennooogniskową oraz przetwarzanie obrazów: estymatory ostrości, algorytmy selekcji ostrości
- Badania eksperymentalne opracowanych algorytmów
 - ✓ Algorytmy selekcji ostrości dla estymatora Sobela i Wariancji, wraz z wpływem filtru medianowego
 - ✓ Badanie wpływu tekstury powierzchni – dla 18tu różnych estymatorów ostrości, co pozwoliło wskazać optymalne estymatory dla różnych powierzchni i materiałów
 - ✓ Analiza wpływu rozmiaru jądra przekształcenia
 - ✓ Analiza wpływu kontrastu, gdzie zaobserwowano również wpływ nasycenia sensora kamery
 - ✓ Wpływ geometrii oświetlacza, zbadano dla 5-ciu różnych oświetlaczy i 6-ciu estymatorów, stosując 2 algorytmy selekcji (MAX i CoG)
 - ✓ Opracowanie funkcji przekształcenia układu współrzędnych związanego z mapą wysokości na układ współrzędnych stanowiska, która jest podstawą kalibracji stanowiska akwizycji SFF-VARIO
 - ✓ Opracowanie metody, algorytmów i narzędzi (wzorców) do kompensacji zmiennego powiększenia (pola widzenia) podczas skanowania. Dyskusja błędów wyznaczenia korekcji.
 - ✓ Badania aberracji optycznych wraz z opracowaniem modelu dystorsji i wyznaczeniem błędów reprojekcji, co pozwoliło wskazać użyteczny zakres skanowania niewymagający dodatkowego przetwarzania.

- ✓ Badanie zmian natężenia oświetlenia podczas skanowania w odniesieniu do metody klasycznej SFF
- ✓ Opracowanie sposobu wyznaczania map ufności i ich użycie do oceny wiarygodności rekonstrukcji.
- Walidacja opracowanego systemu akwizycji 3D metodą SFF-vario
Opracowano metodę walidacji wraz z obiektem wzorcowym i algorytmami przetwarzania. Dobrze przemyślany obiekt testowy, zawiera różne średnice i kształty otworów, stożków i stopnie umożliwiając kompleksowe badanie systemów obrazowania 3D, zwłaszcza w kontekście problemu okluzji. Ilościowa ocena chmur punktów 3D oraz przekrojów wraz z dyskusją błędów jest bardzo wartościowa.
- Wnioskowanie
Autor wykazał się umiejętnością wyciągania wniosków z uzyskanych wyników i krytycznej dyskusji w odniesieniu do postawionych zadań badawczych.

Zastosowane metody badawcze są interdyscyplinarne, z bardzo dużym udziałem zaawansowanego przetwarzania danych. Są odpowiednie do zakresu realizowanych prac, obejmują wszystkie typowe działania zgodnie z prawidłową metodologią badawczo-rozwojową.

6. Zagadnienia dyskusyjne i uwagi krytyczne

Pytania do Doktoranta uszczegóławiające i poszerzające przedstawione treści, wymagające odpowiedzi pisemnej

- 1) Czy metoda obrazowania 3D z użyciem światła strukturalnego jest bardziej rozszerzeniem metody stereowizyjnej czy też triangulacji laserowej?
- 2) W jaki sposób zrealizowano synchronizację soczewka VARIO - kamera, proszę o opinię porównawczą wydajności różnych podejść.
- 3) Czy zmiana apertury (przysłony) soczewki spowoduje zmianę gęstości strumienia świetlnego? (s. 29 i Rys. 2.5)
- 4) Głębina ostrości (DoF) dla optyki sterowalnej jest zmienna w zależności od położenia w osi Z (s. 58 (tabela 4.1) - z czego to wynika?
- 5) „... poprzez zmianę drogi optycznej światła (drogi jaką pokonuje światło od oświetlacza do sensora kamery) zmianie ulega także natężenie oświetlenia powierzchni w zależności od odległości systemu wizyjnego od obrazowanej powierzchni.” (s. 58) - a jak to będzie w przypadku oświetlenia skolimowanego? Liniowego?
- 6) Jak wielkość jądra przekształcenia (rozdział 7.5.3) wpływa na wydajność przetwarzania obrazów?
- 7) W jakim stopniu zmiana czasu ekspozycji jest tożsama ze zmianą natężenia oświetlenia, w warunkach statycznych?
- 8) Algorytmy selekcji płaszczyzny ostrości – zaproponowano MAX i CoG. Jakie jest uzasadnienie, czy MAX jest bardziej odporny na zakłócenia niż interpolacja krzywą Gaussa? (s. 101)
- 9) Badanie polegało na 6-krotnej rejestracji 200 obrazów różnych powierzchni w zakresie zmian mocy skupiającej soczewki sterowalnej od -2.00 D do 0.00 D. Jak uzasadnić taki wybór, gdyż pełen zakres zmian mocy skupiającej to -3D - +3D? Czy charakterystyka soczewki jest liniowa w całym zakresie? (s.103)
- 10) Jak zinterpretować wyniki pokazane na wykresie rys 7.6b – dlaczego algorytm MAX nie znalazł poprawnie wysokości? (s.104)

Inne uwagi drobne

Strona tytułowa – tylko po angielsku, Rok wydania 2024 – powinno być 2025

Strona 16

„W badaniach wykorzystano (...) tworzywa sztuczne wytwarzane metodami generatywnymi”
- tworzywa sztuczne są przetwarzane technologiami generatywnymi, nie wytwarzane

Strona 23

„sensory CMOS charakteryzują się zabudową przetwornika ADC w każdy piksel” – tak, ale szczególny przypadek.

Strona 51 i Strona 61

Tytuł rozdziału „Porównanie wartości estymatora ostrości”

Lepiej „Wyszukanie punktów ostrości” albo „Rekonstrukcja modelu 3D”

Strona 54 – rys 5.4

Proponuje inaczej opisać płaszczyzny – bo „płaszczyzna ostrości” również występuje w płaszczyźnie sensora

Strona 69 – w stosunku do materiałów ceramicznych” – ma być „szklanych”

Strona 69 „ostrzenie obrazu” – bardziej formalnie „ustawianie ostrości”

Strona 91 – rys 6.7

Wzorec piłokształtny obrazowany metodą SFF – uzupełnić, jakie algorytmy przetwarzania zastosowano.

Strona 106 rys 7.8 i Strona 107 rys 7.9 – „powierzchnia plastikowa”

Ma być „powierzchnia z tworzywa sztucznego”

Strona 116 Rozdział 8

Niefortunny tytuł „Transformacja obraz – świat”

„Transformacja układów współrzędnych obraz – stanowisko”

Strona 118

Jest „w zakresie <2900mm, 3000mm>” Ma być „w zakresie <290mm, 300mm>”

Strona 119

Ujemne wartości mocy skupiającej odpowiadają większym odległością roboczym na wykresie rys. 8.3 – jest odwrotnie

7. Konkluzja

Recenzowana praca doktorska mgr inż. Bartosza Lenty, pt.: „Integracja optyki sterowalnej do obrazowania 3D metodą SFF ” (Integration of Controllable Optics into 3D Imaging via the SFF Method) podejmuje bardzo ważny i aplikacyjny temat skanowania 3D dla zastosowań przemysłowych. Problem dotyczy bowiem zwiększenia wydajności, odporności na zakłócenia i rozszerzenia zakresu.

Autor poprawnie postawił cel badawczo-rozwojowy, zaproponował sposób rozwiązania (soczewka VARIO) i zdekomponował go na cele cząstkowe.

Zakres zaplanowanych i przeprowadzonych prac jest niezwykle obszerny, wiarygodnie przeprowadzony i udokumentowany.

Opracował profesjonalne stanowisko badawcze wraz z implementacją wielu opracowanych algorytmów, na którym przeprowadził eksperymenty akwizycji 3D. Opracowana metoda skanowania SFF bazuje na optyce sterowalnej (VARIO), stąd konieczne było rozwiązanie szeregu specyficznych problemów, jak np. przetwarzanie stosu obrazów o zmiennej rozdzielczości i polu widzenia. Autor opracował oryginalne algorytmy przetwarzania obrazów 3D. Opracował też metodę i narzędzia do ilościowej oceny różnych algorytmów przetwarzania. Opracowaną metodę skanowania SFF-vario poddał rzetelnym i kompleksowym badaniom, również walidacyjnym.

Moja dociekliwość naukowa i postawione pytania o charakterze poszerzającym są dowodem możliwości podjęcia dyskusji eksperckiej w dziedzinie systemów wizyjnych z Autorem, z której jako recenzent skorzystałem. Zaś moje uwagi i wskazane drobne uchybienia w żaden sposób nie umniejszają osiągniętych wyników niniejszej pracy.

Na pochwałę zasługuje również niezwykle staranna edycja przedłożonej rozprawy.

Wobec powyższego, stwierdzam, że Doktorant z wyróżnieniem wykazał się przygotowaniem do prowadzenia badań naukowych i przemysłowych.

Stwierdzam, że opiniowana praca mgr inż. Bartosza Lenty, pt.: „Integracja optyki sterowalnej do obrazowania 3D metodą SFF ” (Integration of Controllable Optics into 3D Imaging via the SFF Method) z dnia 20 lipca 2018 roku "Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce" (Dz.U. 2022 poz. 574 z późniejszymi zm.) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, Akademii Górniczo Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, o dopuszczenie jej Autora do dalszych etapów postępowania.

Ponadto **wnioskuję o poddanie pod głosowanie wyróżnienia niniejszej pracy doktorskiej mgr inż. Bartosza Lenty**, za bardzo ambitny i obszerny zakres przeprowadzonych badań w zakresie przemysłowych systemów wizyjnych, a szczególnie metody obrazowania 3D SFF-vario wraz z algorytmami przetwarzania obrazów oraz rzetelną ich ocenę. Opracowane rozwiązania przez doktoranta są istotne dla rozwoju metrologii optycznej oraz użyteczne aplikacyjne.

dr hab. inż. Jacek Reiner, profesor uczelni

Politechnika Wrocławska

Wrocław 05.09.2025

dr hab. inż. Jacek Reiner, profesor uczelni
Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczny
Katedra Zaawansowanych Technik Wytwarzania
Wyb. S. Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
jacek.reiner@pwr.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Bartosza Lenty

pt.: „Integracja optyki sterowalnej do obrazowania 3D metodą SFF”
(Integration of Controllable Optics into 3D Imaging via the SFF Method)

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Bartosza Lenty pt.: „Integracja optyki sterowalnej do obrazowania 3D metodą SFF” (Integration of Controllable Optics into 3D Imaging via the SFF Method), zrealizowana pod kierunkiem dr hab. inż. Andrzeja Siomy, profesora AGH. Recenzja została opracowana w odpowiedzi na pismo (RD AEEITK/510-2-3/2) Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, Akademii Górniczo Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, dr hab. inż. Ryszarda Srokę, profesora AGH.

1. Obszar problemowy rozprawy

Systemy wizyjnej kontroli jakości są obecnie typowym wyposażeniem technologicznym nowoczesnych systemów wytwórczych. Nie oznacza to bynajmniej, że wszystkie problemy jakościowe są z sukcesem rozwiązywane za ich pomocą. Obszarem wymagającym jeszcze badań i rozwoju jest np. inspekcja 3D. Tutaj szereg opracowań naukowych i aplikacyjnych, dla metody triangulacji laserowej, przedstawił prof. Andrzej Sioma, wskazując również na ograniczenia tego podejścia. Stąd, podjęcie prac nad inną metodą obrazowania 3D - SSF (Shape From Focus) – rekonstrukcja z ostrości (zwana również metodą ogniskowania), przez doktoranta mgr inż. Bartosza Lenty, uważam za doskonały przykład efektywnego rozwijania kompetencji naukowych zespołu w zakresie przemysłowej wizji maszynowej.

Dotychczas bowiem, metoda SFF, nie znalazła szerokiego zastosowania przemysłowego, m.in. z uwagi na ograniczoną wydajność wynikającą ze zmechanizowanego, czasochłonnego skanowania, stąd podatności na zakłócenia, oraz ograniczonego zakresu skanowania wysokości. Doktorant, zaproponował istotną modyfikację tej metody polegającą na użyciu sterowalnego układu optycznego – soczewki płynowej (VARIO).

Wprawdzie, soczewki o zmiennej geometrii są znane, jednakże ich integracja z torami optycznymi systemów wizyjnych skutkuje również koniecznością radykalnych modyfikacji w zakresie algorytmów przetwarzania obrazów. Chodzi tu głównie o zmianę powiększenia, zatem i pola widzenia wynikającego ze zmiany mocy optycznej. Inne istotne pytania badawcze



dotyczą aberracji optycznych, liniowości, kalibracji czy odporności takiego układu na zakłócenia przemysłowe.

W takim kontekście wyzwanie badawcze pt. „Integracja optyki sterowalnej do obrazowania 3D metodą SFF” podjęte przez mgr inż. Bartosza Lenty jako temat pracy doktorskiej uważam za naukowo uzasadnione, gospodarczo ważne i ambitne.

Badania prowadzone w tym zakresie wymagają interdyscyplinarnej wiedzy i umiejętności optomechatronicznych ze szczególnym rozumieniem aspektów przetwarzania i analizy danych przestrzennych, stąd tematyka tej pracy mieści się w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

2. Kompozycja i treść rozprawy

Dysertacja obejmuje 175 stron, podzielona jest na 11 rozdziałów i załącznik. Na początku pracy znajdujemy Streszczenie i anglojęzyczny Abstract oraz wykaz najważniejszych pojęć i skrótów.

We „**Wstępie**” Autor przedstawia motywację do podjęcia swojej pracy badawczej, wskazując na specyficzne wymagania i zakłócenia oddziałujące na systemy wizyjne w warunkach przemysłowych.

Na podstawie powyższych wniosków, został sformułowany nadrzędny cel pracy jako, **modyfikacja metody obrazowania trójwymiarowego SFF w zakresie zmiany sposobu rejestracji stosu obrazów oraz uwzględnienia tej zmiany w algorytmach rekonstrukcji obrazów trójwymiarowych, co ma poprawić parametry obrazowania w warunkach przemysłowych.**

Na podstawie powyższego, określono zakres pracy, obejmujący badania i rozwój zarówno toru optycznego oraz algorytmów przetwarzania obrazów.

Autor sformułował również dwie **tezy badawcze**:

„Zastosowanie optyki sterowalnej oraz autorskich algorytmów rekonstrukcji obrazów w metodzie SF pozwala na zmianę sposobu rejestracji stosu obrazów 2D oraz pozwala na rekonstrukcję sceny 3D.”

„Wprowadzenie optyki sterowalnej do metody SFF pozwala na rozszerzenie zakresu parametrów obrazowania co umożliwia rozszerzenie zakresu możliwych do realizacji zadań kontrolnych.”

Następnie szczegółowo omówiono strukturę pracy z opisem zawartości poszczególnych rozdziałów.

Rozdział 2, zatytułowany „**Obrazowanie w systemach automatyzacji**” zawiera opis najważniejszych zagadnień dotyczących akwizycji obrazów. Autor rozpoczyna od charakterystyki fal elektromagnetycznych w dziedzinie spektralnej wskazując na VIS jako zakres pracy. Następnie omawia najważniejsze parametry optyczne systemów wizyjnych: ogniskowa, rozdzielczość, rozmiar piksela i sensora, apertura, pole widzenia, minimalna odległość ogniskowania głębia ostrości. Dalej znajdujemy omówienie różnych reprezentacji modelu 3D: stos obrazów 2D, mapa głębi, chmura punktów, siatka, woksele.

W rozdziale 3 pt. „**Metody obrazowania 3D**” szczegółowo omówiono stereowizję, światło strukturalne, metodę pomiaru czasu propagacji (ToF), triangulację laserową oraz metodę SFF z pogłębioną analizą prac naukowych z tego zakresu. Wnioski Autora z przeglądu stanu wiedzy w pełni potwierdzają postawione na wstępie założenia:

- dotychczasowe rozwiązania cechuje niewielki obszar obrazowania (kilka milimetrów),
- pożądane jest zwiększenie zakresu XY oraz Z,
- istotnym czynnikiem jest czas akwizycji,
- zakłócenia przemysłowe w postaci drgań i wibracji muszą być uwzględnione.

Rozdział 4, pt. „**Modyfikacja metody SFF**”, to rozdział opisujący autorski program badań. Na tle architektury i funkcji poszczególnych komponentów systemu akwizycji SFF wskazano, omówiono i uzasadniono zadania badawcze. Dla przejrzystości prezentacji Autor wprowadził kodowanie poszczególnych zadań, identyfikując 9 wyzwań zgrupowanych w 6 klas. Na uznanie zasługuje takie metodyczne zaplanowanie i przedstawienie ich w postaci graficznej i tabelarycznej.

W Rozdziale 5 pt. „**Zastosowanie optyki sterowalnej w wizji maszynowej**” tutaj omówiono obiektywy stałogniskowe, zmiennoogniskowe zmechanizowane oraz obiektywy o zmiennej ogniskowej (VARIO) – będące istotą zainteresowań tej pracy. Na podstawie szczegółowej analizy soczewek z elastyczną membraną i soczewek w technologii electrowetting – Autor ocenił i uzasadnił wybór obiektywu membranowego do dalszych badań.

W rozdziale 6 przedstawiono opracowane „**Stanowisko badawcze**”. Na wstępie założenia konstrukcyjne, a dalej omówiono projekt mechaniczny stanowiska umożliwiającego ruchy XYZ w zakresach 250x400x300mm z rozdzielczością 0,01mm. Model stanowiska opracowano w środowisku CAD. Projekt układu sterowania bazuje na sterowniku PLC oraz panelu HMI, zadbane w nim również o aspekty bezpieczeństwa. Sterowanie oferuje 3 tryby pracy: JOG, manualny i synchroniczny. Sterowanie nadrzędne i przetwarzanie obrazów realizowane jest na komputerze PC z komunikacją GigeVision (kamera) i UART (VARIO). Projekt systemu akwizycji bazuje na kamerze Dalsa Nano M2950 z sensorem On-Semi Python5000 P1 (5.1Mpix, global shutter, 4,8um, 1”, 51,8fps), obiektywie Fujinon HF50XA-5M (f=500mm, f/2,4, MOD 200mm) i soczewce sterowalnej OptoTune EL-16-40-TC (apertura 16mm, +/-3D).

Rozdział 7, „**Ocena ostrości na obrazie cyfrowym**” to obszerna część badań własnych przedstawiająca wyniki badań algorytmów przetwarzania obrazów, dla różnych zestawów danych obrazowych.

Na wstępie znajdujemy obszerny przegląd estymatorów, oceny ostrości na obrazie, podsumowany zestawieniem tabelarycznym 18 różnych rozwiązań. Dalej zaprezentowano autorską metodę porównania estymatorów, dla różnych rodzajów powierzchni (metal, tworzywo sztuczne, drewno) o różnej SGP ($R_a = 0,5; 5,9; 22,5 \mu m$) i różnych oświetlaczy (kopułkowy, pierścieniowy, liniowy). W zakresie metod wyboru ostrości wybrano funkcję maksimum (MAX) oraz metodę środka ciężkości (CoG) i opracowano dwa kryteria oceny: błąd średniokwadratowy (RMSE) oraz bezwzględny błąd dopasowania (AFE). Wiarygodność badań wspierana jest z 6-krotnymi ich powtórzeniami.

W zakresie omawianych wyników znajdujemy: badanie algorytmów selekcji płaszczyzny ostrości, wpływ tekstury powierzchni, wpływ rozmiaru jądra przekształcenia, wpływ kontrastu oraz wpływ geometrii oświetlacza.

Rozdział 8 zatytułowano „**Transformacja obraz – świat**”. Omówiono tu wyniki badań nad funkcją przejścia między lokalnymi układami współrzędnych obrazów a układem współrzędnym stanowiska. Badania w tym zakresie są fundamentalne, gdyż rozwiązują problem zmiennego powiększenia obrazów, więc i pola widzenia, wynikający z zastosowania zaobiektywowego soczewki VARIO.

W rozdziale 9 omówiono zagadnienie „**Kompensacji błędów obrazowania**”. Autor omówił oryginalną metodę wyznaczania i kompensacji zmiennego powiększenia. W tym celu opracował dedykowany wzorec, a dzięki metodzie wyznaczania środka ciężkości, nawet

rozmytych obrazów, wykazał, że możliwe jest wyznaczanie ich przesunięcia niezależnie od stopnia rozmycia. Opracowany algorytm został zweryfikowany na przykładzie wzorca schodkowego.

Kolejny z omawianych problemów dotyczy aberracji optycznych – szczególnie dystorsji. Na podstawie analizy błędów reprojekcji na bazie wyestymowanego modelu kamery z wielomianowym modelem dystorsji, stwierdzono, że błędy wprowadzane przez soczewkę VARIO są pomijalne dla ponad 95% zakresu pomiarowego. Potwierdzono ponadto, że nie występuje zmiana jasności obrazów, jak ma to miejsce w klasycznej metodzie SFF.

Bardzo istotnym wkładem Autora jest również rozszerzenie algorytmu o wyznaczanie map ufności, które służą do filtracji danych. W ten sposób poprawiana jest odporność rozwiązania na zakłócenia i jednocześnie poprawiana jest wiarygodność metrologiczna systemu.

Rozdział 10 „**Weryfikacja metody obrazowania**” przedstawia wyniki oceny porównawczej opracowanej metody SFF-vario z metodą triangulacji laserowej (SICK Trispector 1030) oraz z metodą światła strukturalnego (Photoneo PhoXi 3D Scanner S).

Badania porównawcze przeprowadzono na specjalnie zaprojektowanym obiekcie testowym zawierającym różnej średnicy otwory walcowe, stożkowe i stopniowe oraz stożki i stopnie. Obiekt testowy wykonano z materiału Necuron, co wyeliminowało problematykę odbić lustrzanych.

Uzyskane wyniki jednoznacznie potwierdziły przewagę opracowanej metody obrazowania w kontekście minimalizacji okluzji, dla większości przypadków zaobserwowano aż 10 krotną poprawę.

Rozdział 11 to „**Podsumowanie**” przeprowadzonych badań, wnioski i kierunki dalszych badań. Stwierdzono, że postawione tezy zostały potwierdzone otrzymanymi wynikami. Opracowana metoda SFF-vario, jest szybsza i odporna na zakłócenia przemysłowe. Możliwa jest integracja z dowolnymi obiektami stałoogniskowymi i sensorami stosowanymi w systemach wizyjnych. Dalszy potencjał poprawy wydajności związany jest z interfejsem komunikacyjnym kamery.

Bibliografia obejmuje 142 pozycje, aktualne, głównie anglojęzyczne.

Załącznik do dysertacji zawiera „**Model matematyczny estymatorów**”, które były przedmiotem badań w pracy.

Redakcja pracy jest bardzo staranna, kompozycja rozdziałów, przypisy i odsyłacze nie budzą zastrzeżeń. Praca jest napisana dobrym językiem, bez błędów stylistycznych czy redakcyjnych. Forma graficzna i edycyjna są na wysokim poziomie.

3. Ocena celu pracy, tezy i zakresu

Autor jasno i trafnie formułuje cel pracy doktorskiej jako **Modyfikacja metody obrazowania trójwymiarowego SFF w zakresie zmiany sposobu rejestracji stosu obrazów wraz z uwzględnieniem algorytmów rekonstrukcji obrazów trójwymiarowych.**

Opracowana metoda skanowania 3D ma na celu poprawę parametrów obrazowania i umożliwienie jej zastosowania w przemysłowych systemach kontrolno-pomiarowych.

Autor postuluje, że zastosowanie optyki sterowalnej (VARIO) pozwoli wyeliminować toru optycznego napędy elektryczne, co skróci czas akwizycji, uodporni system na zakłócenia przemysłowe, a nawet rozszerzy zakres skanowania. Badania będzie prowadził na opracowanym stanowisku badawczym wraz z autorskimi algorytmami przetwarzania obrazów. Przedmiotem badań będą trzy różne powierzchnie różnych materiałów oraz opracowany

wzorzec z różnymi kształtami i średnicami otworów.

Na wyróżnienie zasługuje opracowany bardzo szczegółowy plan i schemat prac badawczych.

4. Ocena metod badawczych

Niniejsza praca doktorska dowodzi bardzo dobrego opanowania przez Autora zastosowania metod i narzędzi naukowych w pracach badawczych, tj.

- Analiza stanu wiedzy - studium literaturowe.
Autor przeprowadził pogłębione analizy w zakresie najistotniejszych prac i wyników związanych z metodą SFF obrazowania, algorytmów i aplikacji, na ich podstawie sformułował istotne wnioski dla realizacji badań.
- Sformułowanie celu badawczo-rozwojowego, ograniczeń i celów szczegółowych
Sformułowany cel badawczy, zaproponowany sposób rozwiązania są poprawne i ambitne. Jego dekompozycja na zadania szczegółowe, forma opisu i prezentacji na diagramie jest bardzo komunikatywna i poprawna merytorycznie. Zakres planowanych badań jest obszerny i wymaga interdyscyplinarnej wiedzy.
- Pogłębienie podstaw teoretycznych do rozwijanych zagadnień przetwarzania danych pomiarowych.
Jest ściśle związane z obszarem badań, stąd dotyczy metod obrazowania SFF, sterowalnych układów optycznych, algorytmów przetwarzania obrazów: wy
- Opracowanie dedykowanego stanowiska/aparatury badawczej
Opracowane stanowisko badawcze integruje część mechaniczną, sterowania i tor optyczny akwizycji obrazów 3D. Jest zaprojektowane zgodnie z obowiązującymi standardami i w użyciu najnowszych narzędzi projektowych. Wykonane jest na najwyższym poziomie technicznym.
- Opracowanie i przebadanie algorytmów
Opracowane i zaimplementowane algorytmy dotyczą sterowania układem pozycjonowania pozycji, sterowanie soczewką zmiennoogniskową oraz przetwarzanie obrazów: estymatory ostrości, algorytmy selekcji ostrości
- Badania eksperymentalne opracowanych algorytmów
 - ✓ Algorytmy selekcji ostrości dla estymatora Sobela i Wariancji, wraz z wpływem filtru medianowego
 - ✓ Badanie wpływu tekstury powierzchni – dla 18tu różnych estymatorów ostrości, co pozwoliło wskazać optymalne estymatory dla różnych powierzchni i materiałów
 - ✓ Analiza wpływu rozmiaru jądra przekształcenia
 - ✓ Analiza wpływu kontrastu, gdzie zaobserwowano również wpływ nasycenia sensora kamery
 - ✓ Wpływ geometrii oświetlacza, zbadano dla 5-ciu różnych oświetlaczy i 6-ciu estymatorów, stosując 2 algorytmy selekcji (MAX i CoG)
 - ✓ Opracowanie funkcji przekształcenia układu współrzędnych związanego z mapą wysokości na układ współrzędnych stanowiska, która jest podstawą kalibracji stanowiska akwizycji SFF-VARIO
 - ✓ Opracowanie metody, algorytmów i narzędzi (wzorców) do kompensacji zmiennego powiększenia (pola widzenia) podczas skanowania. Dyskusja błędów wyznaczenia korekcji.
 - ✓ Badania aberracji optycznych wraz z opracowaniem modelu dystorsji i wyznaczeniem błędów reprojekcji, co pozwoliło wskazać użyteczny zakres skanowania niewymagający dodatkowego przetwarzania.

- ✓ Badanie zmian natężenia oświetlenia podczas skanowania w odniesieniu do metody klasycznej SFF
- ✓ Opracowanie sposobu wyznaczania map ufności i ich użycie do oceny wiarygodności rekonstrukcji.
- Walidacja opracowanego systemu akwizycji 3D metodą SFF-vario
Opracowano metodę walidacji wraz z obiektem wzorcowym i algorytmami przetwarzania. Dobrze przemyślany obiekt testowy, zawiera różne średnice i kształty otworów, stożków i stopnie umożliwiając kompleksowe badanie systemów obrazowania 3D, zwłaszcza w kontekście problemu okluzji. Ilościowa ocena chmur punktów 3D oraz przekrojów wraz z dyskusją błędów jest bardzo wartościowa.
- Wnioskowanie
Autor wykazał się umiejętnością wyciągania wniosków z uzyskanych wyników i krytycznej dyskusji w odniesieniu do postawionych zadań badawczych.

Zastosowane metody badawcze są interdyscyplinarne, z bardzo dużym udziałem zaawansowanego przetwarzania danych. Są odpowiednie do zakresu realizowanych prac, obejmują wszystkie typowe działania zgodnie z prawidłową metodologią badawczo-rozwojową.

6. Zagadnienia dyskusyjne i uwagi krytyczne

Pytania do Doktoranta uszczegóławiające i poszerzające przedstawione treści, wymagające odpowiedzi pisemnej

- 1) Czy metoda obrazowania 3D z użyciem światła strukturalnego jest bardziej rozszerzeniem metody stereowizyjnej czy też triangulacji laserowej?
- 2) W jaki sposób zrealizowano synchronizację soczewka VARIO - kamera, proszę o opinię porównawczą wydajności różnych podejść.
- 3) Czy zmiana apertury (przysłony) soczewki spowoduje zmianę gęstości strumienia świetlnego? (s. 29 i Rys. 2.5)
- 4) Głębina ostrości (DoF) dla optyki sterowalnej jest zmienna w zależności od położenia w osi Z (s. 58 (tabela 4.1) - z czego to wynika?
- 5) „... poprzez zmianę drogi optycznej światła (drogi jaką pokonuje światło od oświetlacza do sensora kamery) zmianie ulega także natężenie oświetlenia powierzchni w zależności od odległości systemu wizyjnego od obrazowanej powierzchni.” (s. 58) - a jak to będzie w przypadku oświetlenia skolimowanego? Liniowego?
- 6) Jak wielkość jądra przekształcenia (rozdział 7.5.3) wpływa na wydajność przetwarzania obrazów?
- 7) W jakim stopniu zmiana czasu ekspozycji jest tożsama ze zmianą natężenia oświetlenia, w warunkach statycznych?
- 8) Algorytmy selekcji płaszczyzny ostrości – zaproponowano MAX i CoG. Jak jest uzasadnienie, czy MAX jest bardziej odporny na zakłócenia niż interpolacja krzywą Gaussa? (s. 101)
- 9) Badanie polegało na 6-krotnej rejestracji 200 obrazów różnych powierzchni w zakresie zmian mocy skupiającej soczewki sterowalnej od -2.00 D do 0.00 D. Jak uzasadnić taki wybór, gdyż pełen zakres zmian mocy skupiającej to -3D - +3D? Czy charakterystyka soczewki jest liniowa w całym zakresie? (s.103)
- 10) Jak zinterpretować wyniki pokazane na wykresie rys 7.6b – dlaczego algorytm MAX nie znalazł poprawnie wysokości? (s.104)

Inne uwagi drobne

Strona tytułowa – tylko po angielsku, Rok wydania 2024 – powinno być 2025

Strona 16

„W badaniach wykorzystano (...) tworzywa sztuczne wytwarzane metodami generatywnymi”
- tworzywa sztuczne są przetwarzane technologiami generatywnymi, nie wytwarzane

Strona 23

„sensory CMOS charakteryzują się zabudową przetwornika ADC w każdy piksel” – tak, ale szczególny przypadek.

Strona 51 i Strona 61

Tytuł rozdziału „Porównanie wartości estymatora ostrości”

Lepiej „Wyszukanie punktów ostrości” albo „Rekonstrukcja modelu 3D”

Strona 54 – rys 5.4

Proponuje inaczej opisać płaszczyzny – bo „płaszczyzna ostrości” również występuje w płaszczyźnie sensora

Strona 69 – w stosunku do materiałów ceramicznych” – ma być „szklanych”

Strona 69 „ostrzenie obrazu” – bardziej formalnie „ustawianie ostrości”

Strona 91 – rys 6.7

Wzorzec piłokształtny obrazowany metodą SFF – uzupełnić, jakie algorytmy przetwarzania zastosowano.

Strona 106 rys 7.8 i Strona 107 rys 7.9 – „powierzchnia plastikowa”

Ma być „powierzchnia z tworzywa sztucznego”

Strona 116 Rozdział 8

Niefortunny tytuł „Transformacja obraz – świat”

„Transformacja układów współrzędnych obraz – stanowisko”

Strona 118

Jest „w zakresie <2900mm, 3000mm>” Ma być „w zakresie <290mm, 300mm>”

Strona 119

Ujemne wartości mocy skupiającej odpowiadają większym odległością roboczym na wykresie rys. 8.3 – jest odwrotnie

7. Konkluzja

Recenzowana praca doktorska mgr inż. Bartosza Lenty, pt.: „Integracja optyki sterowalnej do obrazowania 3D metodą SFF ” (Integration of Controllable Optics into 3D Imaging via the SFF Method) podejmuje bardzo ważny i aplikacyjny temat skanowania 3D dla zastosowań przemysłowych. Problem dotyczy bowiem zwiększenia wydajności, odporności na zakłócenia i rozszerzenia zakresu.

Autor poprawnie postawił cel badawczo-rozwojowy, zaproponował sposób rozwiązania (soczewka VARIO) i zdekomponował go na cele cząstkowe.

Zakres zaplanowanych i przeprowadzonych prac jest niezwykle obszerny, wiarygodnie przeprowadzony i udokumentowany.

Opracował profesjonalne stanowisko badawcze wraz z implementacją wielu opracowanych algorytmów, na którym przeprowadził eksperymenty akwizycji 3D. Opracowana metoda skanowania SFF bazuje na optyce sterowalnej (VARIO), stąd konieczne było rozwiązanie szeregu specyficznych problemów, jak np. przetwarzanie stosu obrazów o zmiennej rozdzielczości i polu widzenia. Autor opracował oryginalne algorytmy przetwarzania obrazów 3D. Opracował też metodę i narzędzia do ilościowej oceny różnych algorytmów przetwarzania. Opracowaną metodę skanowania SFF-vario poddał rzetelnym i kompleksowym badaniom, również walidacyjnym.

Moja dociekliwość naukowa i postawione pytania o charakterze poszerzającym są dowodem możliwości podjęcia dyskusji eksperckiej w dziedzinie systemów wizyjnych z Autorem, z której jako recenzent skorzystałem. Zaś moje uwagi i wskazane drobne uchybienia w żaden sposób nie umniejszają osiągniętych wyników niniejszej pracy.

Na pochwałę zasługuje również niezwykle staranna edycja przedłożonej rozprawy.

Wobec powyższego, stwierdzam, że Doktorant z wyróżnieniem wykazał się przygotowaniem do prowadzenia badań naukowych i przemysłowych.

Stwierdzam, że opiniowana praca mgr inż. Bartosza Lenty, pt.: „Integracja optyki sterowalnej do obrazowania 3D metodą SFF ” (Integration of Controllable Optics into 3D Imaging via the SFF Method) z dnia 20 lipca 2018 roku "Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce" (Dz.U. 2022 poz. 574 z późniejszymi zm.) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, Akademii Górniczo Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, o dopuszczenie jej Autora do dalszych etapów postępowania.

Ponadto **wnioskuję o poddanie pod głosowanie wyróżnienia niniejszej pracy doktorskiej mgr inż. Bartosza Lenty**, za bardzo ambitny i obszerny zakres przeprowadzonych badań w zakresie przemysłowych systemów wizyjnych, a szczególnie metody obrazowania 3D SFF-vario wraz z algorytmami przetwarzania obrazów oraz rzetelną ich ocenę. Opracowane rozwiązania przez doktoranta są istotne dla rozwoju metrologii optycznej oraz użyteczne aplikacyjne.

dr hab. inż. Jacek Reiner, profesor uczelni

Politechnika Wrocławska