

Wrocław 26.11.2021

dr hab. inż. Jacek Reiner, profesor uczelni  
Politechnika Wrocławska  
Wydział Mechaniczny  
Katedra Technologii Laserowych,  
Automatyzacji i Organizacji Produkcji  
Wyb. S.Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław  
[jacek.reiner@pwr.edu.pl](mailto:jacek.reiner@pwr.edu.pl)

### **Recenzja rozprawy doktorskiej**

mgr inż. Kamila Szeląga

pt.: „Metoda wizyjnego wyznaczania trajektorii znanego obiektu z wykorzystaniem stałych elementów sceny”

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Kamila Szeląga pt.: „Metoda wizyjnego wyznaczania trajektorii znanego obiektu z wykorzystaniem stałych elementów sceny”, zrealizowana pod kierunkiem Profesora dr hab. inż. Roberta Sitnika oraz promotora pomocniczego dr inż. Marcina Witkowskiego. Recenzja została opracowana w odpowiedzi na pismo Dziekana Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej Profesora dr hab. inż. Gerarda Cybulskiego (numer pisma WMŁ.521.7.2021).

#### **1. Obszar problemowy rozprawy**

Systemy wizyjne wkraczają w coraz to nowsze obszary aplikacyjne. Obok technik multi/hiperspektralnych, polaryzacyjnych, termowizyjnych, X-ray, etc. - obrazowanie przestrzenne tj. 3D/4D, realizowane w układach wielokamerowych, ciągle pozostaje obszarem wymagającym prac badawczych i rozwojowych, szczególnie gdy problematyka dotyczy minimalizacji ich kosztów przy „kontrolowanej” niepewności pomiarowej oraz odporności na zakłócenia i zmienność sceny.

Pośród aktualnych aplikacji 3D wymienić należy zastosowania w przemyśle, rolnictwie, nawigacji, medycynie i rehabilitacji oraz sporcie. Te ostatnie, uznać należy za bardzo wymagające, z uwagi na duże rozpiętości geometryczne i zmienności oświetlenia scen, duże prędkości i dynamikę ruchu niewielkich obiektów, oczekiwaną małą niepewność pomiarową oraz wymaganą odporność na zmiany sceny i zakłócenia.

W takim kontekście, podjęcie badań przez Pana mgr inż. Kamila Szeląga, nad metodami wizyjnego wyznaczania trajektorii znanego obiektu z wykorzystaniem stałych elementów sceny - uważam za bardzo aktualne i istotne, z punktu widzenia poznawczego i aplikacyjnego. Badania prowadzone w tym zakresie wymagają wiedzy i umiejętności interdyscyplinarnych ze szczególnym rozumieniem aspektów informatycznych.

## 2. Kompozycja i treść rozprawy

Dysertacja obejmuje 166 strony, podzielona została na 5 rozdziałów, spis literatury zawiera 172 pozycje, zamieszczono również słownik pojęć.

We **Wstępie** Autor uzasadnia potrzebę i istotność podjętego przez siebie wyzwania badawczego w zakresie wizyjnej lokalizacji i śledzenia obiektów. Definiuje najistotniejsze kryteria dla takich systemów, jak precyzja, wydajność czasowa oraz niezawodność. Na podstawie przeprowadzonych studiów literaturowych, dotyczących opracowanych rozwiązań z tego zakresu, zawęża obszar własnych badań do systemów wielokamerowych, wspomagających decyzje sędziowskie w rozgrywkach sportowych. Tak wybrany obszar aplikacji nakłada wymagania dotyczące dokładności i szybkości śledzenia, które przy dynamicznie zmieniającym się otoczeniu i dużym prawdopodobieństwie zakłóceń – stanowią ciągle nierozwiązany problem badawczy i rozwojowy. Pośród zidentyfikowanych zakłóceń automatycznego śledzenia, Autor wskazuje: okluzję, modyfikacje sceny i nieplanowane przemieszczenie detektora.

Na podstawie przeprowadzonych studiów literaturowych i koncepcji własnego rozwiązania formułuje tezę pracy o możliwości opracowania metody kalibracji systemu wielokamerowego, która zapewni osiągnięcie założonego poziomu błędów pozycjonowania kamer oraz założonej niepewności śledzenia.

Dla potwierdzenia wyzwania badawczego formułuje bardzo ambitne i obszerne cele poznawcze i użytkowe:

- Opracowanie metody kalibracji i re-kalibracji pozycji i orientacji kamery,
- Opracowanie metody analitycznej kompensacji błędów projekcji perspektywicznej
- Opracowanie modyfikacji algorytmu kalibracji wewnętrznej w sytuacji niedoboru danych kalibracyjnych
- Opracowanie uogólnionego modelu wizyjnego śledzenia obiektu w trójwymiarowej przestrzeni
- Projekt i implementacja niskokosztowego skanera światła strukturalnego
- Projekt i implementacja systemu wspomagającego podejmowanie decyzji sędziowskich w piłce siatkowej.

**W rozdziale 2.** Autor dokonuje **przeglądu stanu wiedzy**. Przegląd obejmuje:

- zagadnienia matematycznego modelowania sceny w układzie jedno i wielokamerowym,
- zagadnienie kalibracji wewnętrznej kamery, w zakresie technik optymalizacji nieliniowej, wyznaczania wypadkowych macierzy transformacji, techniki interpolacyjne oraz techniki hybrydowe. Znajdujemy tu pogłębione studia literaturowe w zakresie metod obliczeniowych zastosowanych w badaniach własnych, jak bezpośrednia transformacja liniowa (DLT), oraz hybrydowa kalibracja Zhanga.
- zagadnienie kalibracji zewnętrznej, obejmujące transformację bezwzględną oraz względną. Pogłębione studia dotyczące metod zastosowanych w badaniach własnych, tj. transformatę Haara, transformatę Hougha, algorytmy EPnP, etc.
- Zagadnienie korekcji wyznaczania środków znaczników, z problematyką błędów ekscentryczności i ich kompensacji.

Zakres przedstawionych studiów literaturowych jest adekwatny do zakresu prowadzonych badań, przegląd literatury jest obszerny i aktualny.

**W rozdziale 3.** Zaprezentowano schemat koncepcyjny opracowanego systemu (Rysunek 3.1), oraz scharakteryzowano jego 11 modułów składowych. Pośród opracowanych algorytmów i

modyfikacji przedstawiono: moduł analizy sceny 2D, moduł kalibracji wewnętrznej, moduł automatycznej rekalkulacji, moduł kalibracji ekscentryczności. Znajdujemy tu walidację różnych opracowanych metod korekcji ekscentryczności, z opisem opracowanej metodyki i przedstawieniem błędów wraz z ich składowymi.

**Rozdział 4.** zatytułowany **Zastosowania praktyczne, przedstawia wyniki badań eksperymentalnych** na wybranych dwóch przykładach: Skanera światła strukturalnego (LSC) oraz Systemu wspomagającego decyzje sędziowskie (VBS).

W przypadku Skanera LSC, opracowano i przeprowadzono aż 6 różnych sposobów ewaluacji działania bazujących na różnego rodzaju wzorcach. Wartościowe jest odniesienie osiągniętych rezultatów w kontekście innych komercyjnych rozwiązań, potwierdzające osiągnięcie założeń w zakresie dokładności.

W przypadku systemu sędziowskiego (VBS) przeprowadzono, badania w środowisku symulacyjnym obejmujące zmianę poziomą i pionową lokalizacji detektora. Ponadto przeanalizowano wpływ zakłócenia położenia jednej z kamer na dokładność rekonstrukcji współrzędnych 3D, przy różnych trajektoriach ruchu piłki. Końcowa ewaluacja obejmuje zdolność systemu do wykrywania odbicia piłki od powierzchni boiska, albo od ręki zawodnika.

**Podsumowanie i wnioski** zaprezentowano w odniesieniu do poszczególnych celów pracy oraz tezy, podkreślając ich pełne osiągnięcie. Wskazano ponadto na kierunki dalszych badań i prac rozwojowych, rozszerzających metody kalibracji i identyfikacji trajektorii, w tym z zastosowaniem podejścia hybrydowego, wielokamerowego oraz wiedzy a priori.

### 3. Zagadnienia dyskusyjne i uwagi krytyczne

Zakres problemowy przedstawiany w pracy jest niezwykle obszerny, dotyczy bowiem dwóch różnych aplikacji, tj. Skanera światła strukturalnego (LSC) oraz Systemu wspomagającego decyzje sędziowskie (VBS). Autor zidentyfikował aż 11 modułów składowych systemu, zagłębiając się w szczegóły rozwiązań poszczególnych z nich. Niestety studiowanie, opracowanego dokumentu jest trudne, gdyż na modułowym schemacie koncepcyjnym (rys. 3.1) oraz dalszych opisach wymagań poszczególnych modułów (rozdział 3.2.1) i opisach samych modułów (rozdział 3.3) nie zachowano pełnej spójności nazewnictwa, a informacje o poszczególnych rozwiązaniach są rozrzucone w tekście. Uważam, że przyjęcie akronimów oraz bardziej intensywne użycie technik diagramowania – jak. np. języka UML – jest wręcz niezbędne dla prezentacji tak złożonych zagadnień informatycznych.

#### Szczegółowe uwagi redakcyjne:

Uważam, że teza pracy jest sformułowana w bardzo rozbudowany, szczegółowy i zawiły sposób. Autor stawia w niej wyzwania dotyczące bardzo szczegółowego zastosowania – śledzenia piłki, podając wartości liczbowe do osiągnięcia. Moim zdaniem takie wyzwania powinny być zawarte raczej w celach.

Pierwszy z celów użytkowych, sformułowany jako: „Opracowanie uogólnionego modelu wizyjnego śledzenia obiektu w trójwymiarowej przestrzeni” – zdecydowanie odnosi się do zagadnień poznawczych, więc powinien być zaliczony do grupy poznawczej, nie praktycznej.

Rozdział 3, został niefortunnie zatytułowany „Koncepcja”, nie jest to zgodnie z jego zawartością, która prezentuje obok koncepcji rozwiązania – jego istotę.

Uzasadnienie w rozdziale 3.1 Wprowadzenie, ma charakter opinii Autora, nie jest potrzebne po przeprowadzeniu studiów literaturowych.

3.1.1 Niskokosztowość skanera nie została określona w sposób ilościowy.

Bardzo głęboki podział podrozdziałów – a sześć poziomów (np. 2.3.4.2.1.4, na stronie 65 i inne), wcale nie poprawia czytelności pracy.

Spis treści przedstawia podział do 4-tego poziomu zagłębienia – uważam, że zbyt głęboko, tym bardziej, że niektóre z podrozdziałów – zawierają pojedyncze zdania. (np. 5.2.2, 5.2.3)

Mała czcionka przy opisach rysunków np. legenda rys. 3.19 (str. 115) i inne, utrudnia interpretację, tym bardziej, że jest bardzo dużo miejsca.

Zgodnie z zasadami opisywania tabel – opisy powinny być nad tabelą np. Tabela 3.2, i inne.

Rozdział 4 – zatytułowany „Zastosowania praktyczne”, zawiera wiele wyników, bardzo cennych badań symulacyjnych, stąd proponowałbym raczej „Weryfikacja i walidacja opracowanego systemu”.

Niepoprawności w opisach osi wykresów, np. Rys. 3.18, jest x[jedn], y[jedn], w podpisie rysunku wartości pomocniczych błędów ex i ey, podobnie na 3.12 i innych

Powtórzenia wykresów na rys. 3.12: miało być dla korekcji metoda dopasowania płaszczyzny i dopasowania okręgu

Szum nie powoduje zniekształcenia obrazu, lecz jego zakłócenie, - zniekształcenie to zakłócenie geometryczne (str. 113)

Za nadmiarowe tj., leżące poza zakresem pracy, uważam treści, choć bardzo krótkie, dotyczące ewaluacja jakościowej na podstawie pomiarów barwnych oraz dotyczące synchronizacji akwizycji (str. 126 i str. 131).

W tabeli 4.2 błędnie podano/powtórzono tytuły kolumn.

Rozdział 4.2.4.3 przedstawia metodę rekonstrukcji, Rozdział 4.2.4.4 prezentuje ocenę - nie powinny być nazywane pomiarem.

**W zakresie merytorycznym bardzo proszę Doktoranta o wyjaśnienie:**

- 1) Działanie opracowanych algorytmów przetwarzania wstępnego oceniano na podstawie danych syntetycznych jak i rzeczywistych (strona 93-94), jakie przyjęto kryteria ich oceny?
- 2) W opracowanym algorytmie analizy sceny, wykrywane są linie boiska. W jaki sposób definiowane są maski umożliwiające filtrowanie map prawdopodobieństwa w przestrzeni Hougha?
- 3) W jaki sposób zaszumiano obrazy szumem Perlina i szumem o rozkładzie Gaussowskim, wyjaśnienie na stronie 113 nie jest precyzyjne, a zaprezentowane obrazy 3.15 i 3.16 nie pokazują wyraźnie różnicy.
- 4) Proszę bardziej szczegółowo omówić wyniki rekonstrukcji złożonego obiektu

geometrycznego „Gargulec” – jakie wnioski można wyprowadzić z takiej metody ewaluacji?

- 5) Proszę szerzej omówić, na podstawie jakich kryteriów uznano, że model symulacyjny (do renderingu) w dostateczny sposób odzwierciedla scenę rzeczywistą?
- 6) Proszę o rozszerzenie informacji o ewaluacji opracowanego systemu wspomagającego decyzje sędziowskie w warunkach rzeczywistych.

#### 4. Oryginalne osiągnięcia i konkluzja

Recenzowana praca pt. „Metoda wizyjnego wyznaczania trajektorii znanego obiektu z wykorzystaniem stałych elementów sceny” ma charakter badań eksperymentalnych i aplikacyjnych nad autorskimi algorytmami. Zakres przeprowadzonych prac jest bardzo obszerny, został podzielony na 11 modułów, których opracowanie wymagało istotnego poznania problemów przetwarzania i analizy danych przestrzennych oraz metod ich rozwiązywania, stąd badania literaturowe są bardzo obszerne. Doktorant opracował metody badania i oceny, dostępnych oraz samodzielnie opracowanych, rozwiązań algorytmów.

Na szczególnie wartościowe, choć niedostatecznie podkreślone przez Doktoranta, uważam zastosowanie metod numerycznych propagacji światła (renderingu) do badania i optymalizacji złożonych systemów wizyjnych w zakresie akwizycji obrazów oraz ich przetwarzania i analizy. Wymagało to opracowania modeli numerycznych generujących dane do zaplanowanych eksperymentów. Dotyczy to szczególnie możliwości generowanie zdarzeń „rzadkich” i zakłóceń. Zaprezentowana metoda pozwala bowiem na określenie niepewności pomiarowej i odporności systemu dynamicznego.

Osiągnięte przez Doktoranta cele zostały osiągnięte, ponadto uzyskane wyniki potwierdzają osiągnięcie wyzwań stawianych w tezie.

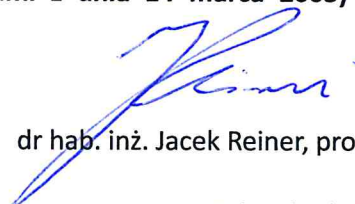
Doktorant wykazał, wiedzę i umiejętności w zakresie opracowywania nowych zaawansowanych rozwiązań informatycznych i opracowywania metod ich oceny, analizy oraz raportowania ich wyników. Sformułował problem badawczy i zaplanował jego realizację, pogłębił wiedzę teoretyczną niezbędną do rozwiązania osiągnięcia postawionych celów badawczo - rozwojowych.

Należy docenić, że wyniki badań zostały opracowane w ramach projektów, we współpracy z firmą SMARTTECH3D – projekt ACTPHAST oraz dla Polskiej Fundacji Piłki Nożnej – projekt OGX|BallTracking.

Cele poznawcze i użyteczne postawione przez Autora zostały z sukcesem osiągnięte, w sposób prawidłowy, co mimo zgłoszonych przeze mnie uwag krytycznych i polemicznych, dowodzi przygotowania Doktoranta do prowadzenia badań naukowych i przemysłowych.

Wyniki przeprowadzonych badań przez Doktoranta zostały zakomunikowane na forum międzynarodowym jako publikacja w Opto-Electronics Review.

**Stwierdzam, że opiniowana praca mgr inż. Kamila Szeląga spełnia warunki stawiane przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytule naukowym w określeniu do rozpraw doktorskich (Dz. U. Nr 65 poz. 595, z późniejszymi zmianami z dnia 14 marca 2003) i może być dopuszczona do publicznej obrony.**



dr hab. inż. Jacek Reiner, profesor uczelni

Politechnika Wrocławska