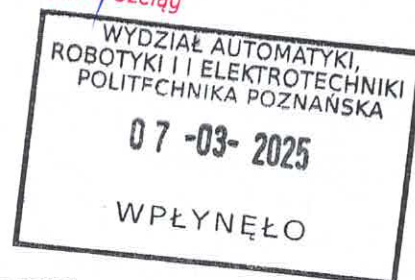


prof. dr hab. inż. Krzysztof Okarma
Katedra Przetwarzania Sygnałów i Inżynierii Multimedialnej
Wydział Elektryczny
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

PRZEWODNICZĄCY RADY DYSCYPLINY
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne
prof. dr hab. inż. Wojciech Szeląg

Szczecin, 3.03.2025 r.



RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
dla Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne
Politechniki Poznańskiej

*opracowana na podstawie uchwały nr 27/2024-2028 Rady Dyscypliny Automatyka,
Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej z dnia 17.12.2024 r.
oraz pisma Przewodniczącego Rady prof. dr. hab. inż. Wojciecha Szeląga z dnia 19.12.2024 r.*

Tytuł rozprawy: **Rozwój metod śledzenia markerów pasywnych dedykowanych dla lekkich jednostek latających z wykorzystaniem optycznych systemów przechwytywania ruchu**

Autor rozprawy: **mgr inż. Marek Retinger**

Dyscyplina naukowa: **automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne**

Promotor: **dr hab. inż. Paweł Drapikowski, prof. PP**

I. TEMATYKA, TEZA NAUKOWA I CEL ROZPRAWY

Współczesna robotyka mobilna, w szczególności dynamiczny rozwój oraz wzrost popularności bezzałogowych pojazdów latających, w tym konstrukcji lekkich, stwarza nowe wyzwania oraz obszary badawcze dotyczące nie tylko konstrukcji dronów, ale także w obszarze ich pozycjonowania, czy też autonomicznej nawigacji. W rozwoju tych metod niebagatelną, a często wręcz dominującą rolę, odgrywają systemy wizyjne, wymagające jednakże do poprawnego działania precyzyjnej kalibracji nie tylko poszczególnych kamer, ale także całej analizowanej sceny, w której porusza się robot mobilny. Recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Marka Retingera pt. „Rozwój metod śledzenia markerów pasywnych dedykowanych dla lekkich jednostek latających z wykorzystaniem optycznych systemów przechwytywania ruchu” bardzo dobrze się w te trendy rozwojowe wpisuje, stanowiąc interesującą lekturę dla innych badaczy zajmujących się podobnymi zagadnieniami. Jest ona ściśle związana z dyscypliną naukową, w której Doktorant ubiega się o nadanie stopnia naukowego, choć zawiera też pewne elementy związane z inżynierią materiałową, co można uznać za przejaw „dobrze pojętej” interdyscyplinarności, charakterystycznej dla wielu współczesnych badań, zwłaszcza w obszarach automatyki czy informatyki.

Tematyka rozprawy jest zatem bez wątpienia aktualna i trafnie dobrana. Hipotezy badawcze zostały określone poprawnie, podobnie jak cele badawcze, choć wymieniona wśród nich analiza porównawcza wpływu znaczników o zredukowanym rozmiarze i masie na odtwarzanie trajektorii oraz czas trwania lotu jednostek mogłaby zostać sformułowana nieco inaczej (takie ujęcie badań w tym zakresie kojarzyć się może raczej z porównaniem znanych rozwiązań aniżeli z analizą wpływu w rozumieniu badawczym, która faktycznie została w pracy wykonana). Tym niemniej wszystkie cele rozprawy zostały w rozprawie osiągnięte a hipotezy badawcze udowodnione. Warto zauważyć, iż w trakcie realizacji rozprawy Kandydat na bieżąco publikował osiągnięte wyniki, czego wyrazem jest 16 współautorskich publikacji, w większości ściśle związanych z tematyką doktoratu.

II. ZAWARTOŚĆ MERYTORYCZNA ROZPRAWY

Rozprawa doktorska zawiera 5 zasadniczych rozdziałów. Pierwszy z nich ma charakter wprowadzający. Autor przedstawił w nim problematykę badawczą, motywację do podjęcia tematu rozprawy, a także hipotezę badawczą oraz cel pracy. Ponadto znalazły się w nim definicje stosowanych w rozprawie pojęć oraz wykaz skrótów i akronimów.

Pozostałe rozdziały ułożone są w logiczny sposób, uzasadniony zarówno postępowaniem prac, jak też stopniem złożoności omawianych w nich zagadnień. W rozdziale drugim omówione zostały systemy pozycjonowania obiektów wraz z ich klasyfikacją uwzględniającą systemy akustyczne, magnetyczne, mechaniczne oraz inercyjne, ze szczególnym uwzględnieniem optycznych metod przechwytywania ruchu. Omówiona została zasada działania oraz budowa tego rodzaju systemów, jak również stosowane narzędzia kalibracyjne. Przedstawiono także aktualny stan wiedzy w tym zakresie. Dodatkowo, Doktorant przedstawił dość szczegółowe omówienie materiałów retro-refleksyjnych, które mogą być stosowane jako elementy znaczników pasywnych, zarówno płaskich, jak również trójwymiarowych. Kandydat zwrócił uwagę na istotność wybranych obszarów badawczych, w szczególności technik materiałowych oraz optymalizacji rozmieszczenia oraz parametrów kamer oraz układu znaczników.

W rozdziale trzecim przedstawiono autorskie wskaźniki jakości pozwalające na ilościową ocenę wyników uzyskiwanych dla różnych konfiguracji systemu przechwytywania ruchu, jak również dla różnych systemów, co jest o tyle istotne, iż badania eksperymentalne zostały przeprowadzone w trzech różnych laboratoriach (dwóch zlokalizowanych na Politechnice Poznańskiej oraz jednym na uczelni w Niemczech). Przedstawiono w nim również mechanizm wykrywania fałszywych znaczników oraz wpływ czynników środowiskowych, w szczególności temperatury, na uzyskiwane wyniki. Omówione zostały zagadnienia konfiguracji kamer wraz z propozycją automatycznego doboru wartości ekspozycji i progu detekcji w taki sposób, aby znajdowały się one możliwie blisko wartości minimalnych, zapewniających poprawne rozpoznawanie znaczników bez występowania fałszywych markerów oraz innych artefaktów przy braku zauważalnego rozmycia obrazu. Jest to o tyle istotne, iż nieprawidłowy dobór tych parametrów w znaczący sposób wpływa na dokładność śledzenia, co zostało wykazane w ramach przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Ponadto, rozdział ten zawiera omówienie dostępnych powszechnie na rynku retro-refleksyjnych materiałów płaskich w postaci 20 rodzajów taśm oraz 11 rodzajów markerów sferycznych.

Przeprowadzona przez Kandydata analiza oraz testy wybranych materiałów pozwoliły na określenie ich przydatności w projektowanym systemie oraz wpływu na uzyskiwane wyniki. W efekcie, poza wyborem materiałów na potrzeby lekkich znaczników płaskich, Doktorant zaproponował autorskie znaczniki trójwymiarowe bazujące na drewnianych kulach o niewielkiej średnicy (14 mm), których powierzchnia została oklejona materiałem retro-refleksyjnym określonym jako IF-6.

W rozdziale czwartym przedstawione zostały wyniki przeprowadzonych eksperymentów wraz z ich analizą. Fakt empirycznej weryfikacji wcześniej przeprowadzonych prac badawczych jest jednym z atutów pracy, choć ma on w dużej mierze charakter inżynierski. Tym niemniej stanowi on wartościowe uzupełnienie części typowo badawczej, co jest zresztą charakterystyczne dla tematyki pracy ściśle związanej z praktycznymi zastosowaniami proponowanych rozwiązań. Doktorant omówił stosowane platformy walidacyjne w postaci dwóch klasycznych jednostek latających z czterema wirnikami (Bitcraze Crazyflie 2.1, DJI Tello Edu), jednostki skrzydlatej inspirowanej biologicznie (Flapper Nimble+ Edu), a także manipulator Kuka KR200/2, który posłużył do wstępnej weryfikacji proponowanych rozwiązań. Warto nadmienić, iż jego wybór został przekonująco uzasadniony, pomimo iż w tytule rozprawy jasno sprecyzowano, iż rozwijane metody śledzenia markerów mają służyć lekkim jednostkom latającym. Ponadto, Kandydat omówił scenariusze badań eksperymentalnych oraz warunki, w jakich były one przeprowadzane, zarówno w dwóch laboratoriach zlokalizowanych na macierzystej uczelni, jak również w Brandenburgische Technische Universität w Cottbus. Dokonał również walidacji oraz analizy uzyskanych danych eksperymentalnych w kontekście widoczności znaczników z uwzględnieniem ustawień kamer, jak również pod względem technik materiałowych. Przeanalizowane zostały wartości autorskich wskaźników jakości widoczności markerów zaproponowanych w rozdziale 3.1, a także czas trwania lotu/zawisu oraz odtwarzalność trajektorii ruchu.

W ostatnim rozdziale, o charakterze podsumowującym, Doktorant przedstawił wnioski wyciągnięte na podstawie przeprowadzonych badań, a także kierunki ich dalszego rozwoju, przeanalizował także stopień osiągnięcia założonych celów w przedstawionej do oceny rozprawie.

III. OGÓLNA OCENA ROZPRAWY I UWAGI DYSKUSYJNE

Recenzowana rozprawa zawiera interesujące wyniki eksperymentalne, świadczące o bardzo dobrej orientacji Doktoranta w zagadnieniach związanych ze śledzeniem trajektorii lotu lekkich pojazdów latających, jak również zagadnieniach powiązanych dotyczących widzenia maszynowego, w tym kalibracji kamer, a także wybranych aspektów inżynierii materiałowej w zakresie materiałów retro-refleksyjnych.

W znacznej części pracy Autor posługuje się znanymi metodami, co stanowi jeden ze słabszych elementów rozprawy z naukowego punktu widzenia, jednak należy zauważyć, iż w umiejętny sposób łączy On poszczególne elementy składowe systemu śledzenia ruchu, wypełniając pewne, trafnie wskazane, luki badawcze. W tym właśnie, dość unikalnym, połączeniu upatrywać należy wartości naukowej pracy, uzupełnionej autorskimi propozycjami rozwiązań, w szczególności dotyczących modyfikacji markerów. Wśród oryginalnych osiągnięć mgr. inż. Marka Retingera wymienić należy:

- wykazanie, iż odpowiednie zmiany ustawień kamer na poziomie programowym umożliwiają uzyskanie lepszej widoczności markerów pasywnych, co umożliwia zastosowanie mniejszych oraz – co istotniejsze – znacznie lżejszych znaczników przy zachowaniu tej samej widoczności,
- propozycję algorytmów automatycznego doboru czasu ekspozycji oraz progu detekcji dla optycznych systemów przechwytywania ruchu, które działają w paśmie IR, umożliwiających zachowanie dokładności śledzenia ruchu obserwowanego obiektu, wraz z ich przetestowaniem z użyciem autorskiego oprogramowania,
- wykazanie, iż dzięki zastosowaniu odpowiedniego materiału retro-refleksyjnego, przewyższającego parametrami markery fabryczne, możliwe jest zmniejszenie masy znaczników, w szczególności zbudowanie markerów płaskich o bardzo dobrej widoczności kątowej,

- zbadanie zależności czasu zawisu lub lotu od zastosowanych znaczników oraz wykazanie zalet zaproponowanych markerów płaskich pod tym względem.

Ponadto, docenić należy rzetelną analizę dostępnych rozwiązań oraz dużą liczbę wykonanych badań eksperymentalnych, co pozwoliło na weryfikację hipotez badawczych. Przykładem takich badań jest chociażby przeanalizowanie wpływu temperatury kamer na uzyskiwane wyniki, czy też rozbudowane testy materiałów retro-refleksyjnych. Mocną stroną pracy jest także bogata bibliografia zawierająca prawie 100 pozycji ściśle związanych z tematyką pracy. Wśród nich jest sporo publikacji z ostatnich lat, co dobrze świadczy zarówno o aktualności tematyki rozprawy, jak również o orientacji Autora w stanie badań w związanych z nią zakresie.

Warto zauważyć celowość wyjaśnienia wielu pojęć stosowanych w rozprawie ze względu na ich inną interpretację w pokrewnych obszarach badawczych (np. w uczeniu maszynowym czy analizie obrazów), co słusznie zauważył Kandydat. Dotyczy to w szczególności takich pojęć jak dokładność (*accuracy*), czy precyzja (*precision*). Kandydat trafnie wskazał możliwe kierunki dalszych badań, w szczególności związanych z zastosowaniem czasz kulistych jako rozwiązania pośredniego pomiędzy znacznikami płaskimi oraz sferycznymi.

W trakcie lektury rozprawy pojawiło się kilka wątpliwości oraz pytań o charakterze dyskusyjnym, które nie umniejszają jednak w żaden sposób ogólnej wysokiej oceny merytorycznej rozprawy. Zostały one wymienione poniżej.

Trudno zgodzić się z dość „kategorycznym” stwierdzeniem ze str. 33 dotyczącym niemożliwości usystematyzowania i porównania wielu pojawiających się podejść do poprawy parametrów systemów przechwytywania ruchu. Zadanie to, choć faktycznie trudne i czasochłonne, nie wydaje się jednak niemożliwe do wykonania. Szkoda także, iż Autor nie pokusił się o przeprowadzenie dodatkowych badań nad doбором ustawień kamer dla dwóch i więcej markerów, w tym nakładających się na siebie oraz znajdujących się w dużym obszarze śledzenia.

Nie jest również precyzyjne sformułowanie „czas śledzenia obiektu bliski 100%” znajdujące się na str. 14. Czas mierzony jest w sekundach, domyślić się można jednak, iż chodzi tutaj o wyrażony procentowo stosunek czasu widoczności znaczników umożliwiającego śledzenie ruchu do czasu obserwacji. Podobnie na str. 15 znaleźć można definicję obiektu jako „grupy markerów tworzących pojedynczą bryłę sztywną”, co stanowi pewien „skrót myślowy” – obiekt, a zwłaszcza dron, nie składa się przecież wyłącznie z markerów, posiada również inne elementy.

Pewne wątpliwości budzi też sformułowanie na str. 24 dotyczące najprostszego wariantu optycznych systemów przechwytywania ruchu. Autor wskazuje tutaj kamery RGB, jednak wydaje się, iż jeszcze prostszym rozwiązaniem o porównywalnej skuteczności byłoby użycie kamer monochromatycznych. Z kolei stwierdzenie, iż „optyczne systemy przechwytywania ruchu stanowią obecnie istotny element wyposażenia laboratorium badawczego” jest zbyt ogólne – o ile może ono dotyczyć laboratoriów z zakresu robotyki czy widzenia maszynowego, o tyle niekoniecznie laboratoriów badawczych z zakresu chemii, medycyny, czy innych obszarów nauki.

Nie jest jasne, co oznacza wartość 200 wskazana jako próg detekcji na str. 76 – czy jest to poziom jasności w skali od 0 do 255?

Nie jest jasne, ile przeprowadzono pomiarów w przypadku wyników przedstawionych w Tabeli 3.7. Wątpliwości budzi także sposób prezentacji wyników jako wartości minimalnych oraz maksymalnych bez

przedstawienia np. wartości średnich lub mediany dla kilku pomiarów. Uzasadnienie przeprowadzenia tylko jednego eksperymentu dla materiałów 3D (str. 64) również nie jest zbyt przekonujące. Czy nie byłoby celowe przeprowadzenie nieco większej liczby eksperymentów np. dla zmieniających się warunków oświetleniowych, które przecież w rzeczywistych zastosowaniach nie zawsze mogą być w pełni kontrolowane?

Wątpliwości budzi także fakt użycia 7 z 10 dostępnych kamer NaturalPoint OptiTrack Prime 13W, które zostały usytuowane w laboratorium z manipulatorem KUKA. Pewnym wyjaśnieniem jest co prawda ograniczona przestrzeń, ale wydaje się, że zastosowanie dodatkowych trzech kamer byłoby możliwe. Warto byłoby przybliżyć ograniczenia, które spowodowały podjęcie decyzji o ograniczeniu liczby użytych kamer.

W czterech scenariuszach eksperymentów wskazanych na str. 79 Autor użył sformułowania „średnia wartość wyników zwróconych przez algorytmy”, które wymaga wyjaśnienia, podobnie jak trzeci scenariusz – nie jest jasne, jakie algorytmy Doktorant ma tutaj na myśli. Podobnie, warto byłoby wskazać motywację wyboru pięciu wskazanych częstotliwości pracy systemu.

Jako jedno z zasadniczych osiągnięć Kandydat wskazuje możliwość redukcji masy znaczników przy zachowaniu dokładności śledzenia. Ponieważ zależy ona także od jakości i parametrów użytych kamer (choćby rozdzielczości), nasuwa się pytanie, czy użycie lepszych kamer pozwoliłoby na dalszą redukcję rozmiaru i masy markerów przy zachowaniu podobnej dokładności śledzenia trajektorii ruchu obiektów.

Nie do końca jest jasne stwierdzenie ze str. 102 dotyczące zapewnienia czasu zawisu o 50% dłuższego przy zastosowaniu markerów płaskich zamiast sferycznych, podczas gdy na str. 97 mowa jest o dwukrotnym wydłużeniu czasu trwania lotu dzięki zastosowaniu markerów płaskich. Czy wnioski te dotyczą różnych jednostek latających?

Jak wspomniano, powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie umniejszają w żaden sposób oceny merytorycznej pracy, jednakże stanowią materiał do dyskusji podczas publicznej obrony rozprawy.

IV. UWAGI SZCZEGÓŁOWE

Poziom edytorski, językowy oraz graficzny recenzowanej rozprawy jest wysoki. Można w niej znaleźć nieliczne, w większości wymienione poniżej, usterki o charakterze typograficznym, czy językowym, zdarzają się także nieliczne błędy interpunkcyjne. Podkreślić jednak należy, iż zdecydowana większość z tych usterek – nieuniknionych przy około stustronicowym tekście rozprawy – jest trudna do wychwycenia, a zatem fakt ich zauważenia nie obniża oceny pracy a nawet przeciwnie – jej wartość dodatkowo podnosi relatywnie niewielka ich liczba oraz niewielkie znaczenie.

Wśród zauważonych drobnych usterek wymienić można:

- rozłączną pisownię słowa „retro refleksyjne” – zdecydowanie częściej spotyka się pisownię łączną lub z łącznikiem: „retrorefleksyjne” lub „retro-refleksyjne”,
- usterki typograficzne, jak „istotą rolę”, „najprostrzej formie” (str. 20), „jest zgody” (str. 48), „Politechniki Poznańskie” (str. 87),
- sformułowanie „pomiędzy odbieranymi pulsami” (str. 21) – powinno być „impulsami”,
- niewłaściwe końcówki fleksyjne, jak „częsta kalibracji” (str. 22), „pozwala dokonać pomiar” (str. 23), „zwiększa refleksyjności”, „ich przeznaczanie” (str. 31), „położenie [...] nie było zmieniana” (str. 62), „uśrednienie wszystkie wartości” (str. 84), „dwie lekkie jednostki

latającej” (str. 93), „aby markery ϕ 7,9 mm mogłyby być prawidłowo śledzone” (str. 94) – powinno być „mogły być”, „w celu uodpornienia wskaźników na anomalia” (str. 99), „materiałów retro refleksyjne” (str. 102)

- niepotrzebne użycie wielkich liter w słowach „amerykański”, „brytyjski”, „chiński” czy „szwedzki” (str. 24),
- błędy językowe w sformułowaniach „opiera się o kule”, „opiera się o grupę mikropryzm” (str. 31), „oparte o systemy” (str. 37) – powinno być „opiera się na...” ,
- zbędna tautologia „tylko i wyłącznie” (str. 42 oraz 85),
- nieprecyzyjne sformułowania na str. 34 dotyczące taśmy mierniczej „o dokładności do jednego milimetra”, czy też „analiza [...] nie została zbadana” (str. 76) – powinno być „wykonana” lub „dokonana”, „czas zawisu w ujęciu markerów płaskich” (str. 94),
- odwrócona kolejność imion i nazwisk autorów - poz. 1 wykazu dorobku naukowego (str. 109),
- pozycjonowanie tabel i rysunków na niektórych stronach nie wydaje się właściwe, lepszym rozwiązaniem byłoby ich umiejscowienie na górze lub na dole strony – str. 87, czy też str. 88.

Jak widać, liczba i znaczenie usterek są niewielkie, bez zauważalnego wpływu na ogólną ocenę pracy. Uznać należy, iż założone cele pracy zostały osiągnięte a tezy udowodnione, co stanowi zdecydowanie najistotniejszy element oceny rozprawy doktorskiej.

V. WNIOSKI KOŃCOWE

Recenzowana rozprawa stanowi samodzielne rozwiązanie problemu naukowego, który doskonale wpisuje się w trendy rozwojowe aktualnie obowiązujące dyscypliny naukowej *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*, w szczególności w aspekcie dotyczącym zagadnień z zakresu współczesnej automatyki i robotyki. Kandydat wykazał w niej znajomość zagadnień dotyczących robotyki mobilnej, wybranych aspektów inżynierii materiałowej, a także metod widzenia maszynowego. Praca stanowi również dowód na posiadane przez Doktoranta umiejętności zaplanowania i praktycznej realizacji badań eksperymentalnych powiązanych z badaniami naukowymi w zakresie robotyki, potwierdzając umiejętność samodzielnego rozwiązywania problemów naukowych z tego obszaru.

Stwierdzam, iż przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska **mgr. inż. Marka Retingera** pt. *„Rozwój metod śledzenia markerów pasywnych dedykowanych dla lekkich jednostek latających z wykorzystaniem optycznych systemów przechwytywania ruchu”*, której promotorem jest dr hab. inż. Paweł Drapikowski, prof. PP, zrealizowana w ramach postępowania o nadanie stopnia doktora wszczętego w dniu 4.12.2024 r. w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*, **spełnia wymagania** stawiane rozprawom doktorskim przez aktualnie obowiązującą ustawę *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018 roku (tekst jednolity Dz. U. z 2024 r. poz. 1571. **Wnioskuje o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.**