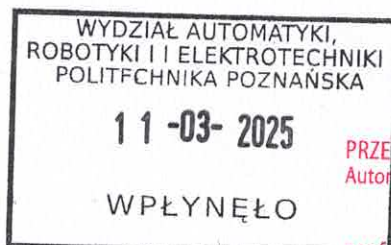


Tytuł, stopień, imię i nazwisko
prof. dr hab. inż. Bogdan Kwolek



data 28.02.2025 r.

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

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

przygotowana dla Rady Dyscypliny Automatyka, Robotyka, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej

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

Autor rozprawy: mgr inż. Marek Retinger

Promotorzy: dr hab. inż. Paweł Drapikowski, prof. PP

1. Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska dotyczy optycznych systemów przechwytywania ruchu (MoCap) dla lekkich obiektów latających. Celem prac badawczo-eksperymentalnych było przebadanie czynników warunkujących widoczność markerów pasywnych w systemach MoCap operujących w zakresie widmowym podczerwieni. Badania realizowano zarówno w obszarze inżynierii materiałów retro-refleksyjnych jak i optymalizacji zestawów parametrów kamer składających się na system MoCap. W pracy zaproponowano wskaźniki jakości do oceny widoczności markerów oraz mechanizm wykrywania fałszywych markerów. Przeanalizowano także wpływ czynników środowiskowych na proces śledzenia markerów, w tym wpływ temperatury kamer na widoczność markerów oraz dokładność wyznaczania położenia markerów. Przebadano eksperymentalnie widoczność markerów w zależności od czasu ekspozycji oraz progu detekcji dla wybranych częstotliwości rejestracji obrazu. Zaproponowano także metody automatyzujące dobór parametrów kamer. Sformułowano oryginalne hipotezy badawcze, które wyrażają się z przekonaniem iż (i) rozwój metod automatycznego doboru ustawień kamer systemów motion capture pozwoli na zastosowanie mniejszych i lżejszych znaczników przy zachowaniu wysokiej jakości śledzenia, (ii) zmiana technik materiałowych pozwoli na budowę znaczników o zredukowanej masie, minimalizując ich wpływ na jednostki latające klasy MAV i niższych, (iii) ograniczenie wpływu znaczników na jednostkę latającą skutkuje wydłużeniem czasu trwania lotu oraz poprawi jego charakterystykę i otworzy nowe perspektywy badawcze. Autor sformułował szereg celów częściowych, które obejmują (i) przebadanie użyteczności materiałów retro-refleksyjnych na potrzeby budowy markerów 2D oraz 3D o masie mniejszej od masy fabrycznych markerów 3D, zapewniających przy tym czas śledzenia obiektu bliski 100% czasu trwania lotu, (ii) zdefiniowanie wskaźników jakości umożliwiających ocenę jakości śledzenia obiektu oraz porównanie charakterystyk widoczności różnych materiałów retro-refleksyjnych, (iii) przeanalizowanie wpływu znaczników o zredukowanym rozmiarze i masie na odtwarzanie trajektorii oraz czas trwania lotu jednostek latających, (iv) opracowanie metody automatycznego doboru konfigurowalnych parametrów kamer, skutkującej przy tym lepszą

widocznością markerów. Przyjęte cele pracy zrealizowano proponując autorskie wskaźniki jakości do oceny jakości śledzenia obiektu oraz pojedynczych markerów pasywnych, składających się na obiekt. Zaproponowano metody automatycznego doboru czasu ekspozycji oraz progu detekcji dla optycznych systemów przechwytywania ruchu, skutkujących lepszą widocznością znaczników przy zachowaniu wymaganej dokładności śledzenia. W oparciu o przebadane eksperymentalnie właściwości dostępnych na rynku materiałów retro-refleksyjnych wybrano materiał zapewniający lepszą widoczność markerów w porównaniu do widoczności uzyskiwanej w oparciu o fabryczne markery, stwarzający przy tym możliwość wykonania płaskich markerów z dobrą widocznością w szerokim zakresie orientacji markera w stosunku do kamery. Przebadano eksperymentalnie lekkie jednostki latające pod kątem czasu trwania lotu oraz odtwarzalności trajektorii z użyciem fabrycznych znaczników oraz markerów płaskich, wskazując przy tym, że czas zwisu obiektu latającego z markerami płaskimi może być nawet o 50% dłuższy w porównaniu do czasu zwisu drona z markerami fabrycznymi. Prawdziwość tez badawczych wykazano empirycznie. Tematyka podjęta w rozprawie jest ważna i interesująca poznawczo, a także co istotne, dotyczy ważnych zagadnień praktycznych związanych z wyznaczaniem trajektorii oraz sterowaniem lekkich obiektów latających. Wnioski wynikające z przeprowadzonych badań oraz prac eksperymentalnych są istotne dla projektantów lekkich dronów oraz badaczy zajmujących się problematyką sterowania lekkich obiektów latających.

2. Rozprawa napisana jest w języku polskim. Praca składa się z trzech zasadniczych rozdziałów, wstępu oraz podsumowania. W głównych rozdziałach pracy scharakteryzowano systemy przechwytywania ruchu w kontekście aktualnego stanu wiedzy, omówiono prace badawcze oraz proponowane rozwiązania, a następnie omówiono uzyskane wyniki. Rozprawa liczy łącznie 126 stron. Bibliografia liczy łącznie 97 pozycji. Streszczenia pracy przedstawiono zarówno w języku polskim jak i w języku angielskim. We wprowadzeniu przedstawiono motywację do podjęcia badań, sformułowano problematykę badań oraz znaczenie problematyki. W dalszej części wprowadzenia sformułowano hipotezy badawcze, określono cele pracy, zdefiniowano podstawowe pojęcia, zestawiono akronimy oraz omówiono zawartość rozprawy. W podsumowaniu pracy Autor przedstawił kluczowe wnioski wynikające ze zrealizowanych badań oraz prac empirycznych, a także ocenił stopień realizacji przyjętych celów pracy, wskazując przy tym na oryginalne aspekty pracy. W końcowej części podsumowania omówiono możliwe kierunki rozwoju pracy. Szczegółowy wykaz dorobku naukowego doktoranta został zamieszczony na końcu rozprawy w formie Aneksu. We wspomnianym aneksie zamieszczono także diagram przepływu danych w systemie działającym w czasie rzeczywistym oraz tabelę prezentującą rozszerzone wyniki badań nad materiałami do budowy markerów. W końcowej części aneksu zamieszczono spis tabel oraz spis rysunków. Od strony formalnej rozprawa zredagowana jest poprawnie. Wyniki uzyskane w niniejszej rozprawie stanowią ważne rozszerzenie i uzupełnienie wyników znanych z literatury. Rezultaty badań są wartościowe w kontekście zastosowań praktycznych. Wyniki zostały zaprezentowane w kilku współautorskich artykułach naukowych w czasopismach o wysokim współczynniku wpływu (IF). W artykułach opublikowanych w czasopismach IEEE Robotics and Automation Letters oraz Robotics and Autonomous Systems o współczynniku wpływu odpowiednio 4,6 oraz 4,3 doktorant był pierwszym autorem. Praca doktorska oraz opublikowane prace stanowią cenny materiał źródłowy dla przyszłych badań nad lekkimi maszynami latającymi i ich systemami sterowania.

3. Zasadniczym osiągnięciem naukowym doktoranta jest metoda automatycznego doboru czasu ekspozycji oraz progu detekcji kamer. Na osiągnięcie składa się także metoda detekcji fałszywych markerów oraz metoda oceny widoczności markerów. Na wysoką wartość dysertacji składają się wyniki badań w obszarze inżynierii materiałów retro-refleksyjnych. Warte podkreślenia jest to, że liczba pokrewnych prac jest mała. Co więcej, Autor podkreślił, że obecnie nie ma konkurencyjnej metody, która umożliwiałaby automatyczny dobór takiego czasu ekspozycji oraz progu detekcji kamer, które gwarantowałyby uzyskanie dobrej widoczności markerów, ograniczałyby prawdopodobieństwo pojawienia się fałszywych markerów, nie zmniejszając przy tym dokładności pomiarów położenia. Rysunek 2.15 oraz Tabela 2.1 dość precyzyjnie umiejscawiają osiągnięcia Autora w odniesieniu do pokrewnych prac. Zagadnienie doboru parametrów kamer składających się na system MoCap jest rzadko poruszane w literaturze przedmiotu.

Dzięki zaproponowanej metodzie oceny widoczności markerów w systemach MoCap możliwe są oceny widoczności obiektów oraz markerów w systemach od różnych producentów, w tym z różną liczbą kamer oraz różnym usytuowaniem kamer. Efektem prac badawczych są wskaźniki jakości. Dzięki wyrażeniu wskaźników przez dość proste formuły matematyczne, wyznaczanie wartości wskaźników wymaga małych nakładów czasowych, stwarzając tym samym możliwość wyznaczania wartości wskaźników w czasie rzeczywistym. Wartość podejścia dodatkowo podnosi metoda wykrywania fałszywych markerów, która zapewnia bardziej krzepkie wyznaczanie wartości wskaźników w razie refleksów lub pojawienia się fałszywych markerów. Metoda wykorzystuje informację o położeniu znaczników 2D definiujących bryłę sztywną. Współrzędne markerów są kolejno dopasowywane dla każdej z kamer z osobna w oparciu o odległość euklidesową i informację o położeniu markerów dla danej bryły. W omawianej części badań pokazano także eksperymentalnie, że temperatura kamer ma namacalny wpływ na dokładność wyznaczania położenia obiektów/markerów.

W badaniach związanych rozwojem metody do automatycznego doboru czasu ekspozycji oraz progu detekcji kamer przedmiotem prac były analizy wpływu czasu ekspozycji na widoczność obiektu oraz dokładność wyznaczania jego pozycji. Podano zależności wiążące czas ekspozycji z polem powierzchni markera. Zaprezentowano również sposób użycia wskaźników jakości do weryfikacji wartości wybranego czasu ekspozycji.

W badaniach związanych rozwojem metody do automatycznego doboru czasu ekspozycji oraz progu detekcji kamer przedmiotem prac były analizy wpływu czasu ekspozycji na widoczność obiektu oraz dokładność wyznaczania jego pozycji. Podano zależności wiążące czas ekspozycji z polem powierzchni markera. Zaprezentowano również sposób użycia wskaźników jakości do weryfikacji wartości wybranego czasu ekspozycji.

W pracach eksperymentalnych związanych z inżynierią materiałów retro-refleksyjnych przedmiotem analiz były nie tylko materiały retro-refleksyjne, ale także materiały nierefleksyjne oraz refleksyjne, przy czym analizowano zarówno taśmy jak i sfery. Spośród nich wyselekcjonowano 20 materiałów retro-refleksyjnych, które wykorzystano do budowy markerów płaskich. Charakterystyki materiałów określano w oparciu o autorskie narzędzia pomiarowe oraz analizy widoczności markerów.

Badania eksperymentalne zrealizowano z wykorzystaniem dwóch lekkich jednostek latających, bioinspirowanej jednostki latającej oraz manipulatora. Ewaluację proponowanych rozwiązań przeprowadzono w oparciu o trzy konfiguracje kamer firmy NaturalPoint OptiTrack zainstalowane w trzech różnych laboratoriach, w tym w laboratorium w Brandenburgische Technische Universität. Warto wspomnieć, że mimo tego iż systemy MoCap oparte były

kamerach z serii Prime 13, to różniły się one między sobą optyką oraz oświetlaczami w paśmie poczerwieni. Prace eksperymentalne zrealizowano w oparciu o autorskie oprogramowanie w języku C/C++ oraz w języku Python w trzech scenariuszach. Pierwszy scenariusz dotyczył prac związanych z widocznością markerów, zaś dwa pozostałe dotyczyły prac związanych z pomiarami czasu trwania lotów oraz odtwarzalności trajektorii. Eksperymenty związane z wyznaczaniem widoczności markerów pasywnych stanowiły przeważającą część zrealizowanych prac. Celem uzyskania wiarygodnych wyników przeloty wykonywano kilkakrotnie. Wyniki badań eksperymentalnych pokazały, że dzięki proponowanym metodom uzyskać można lepszą widoczność markerów, niż dla parametrów domyślnych. Warto przy tym wspomnieć, że uzyskane wyniki są znacznie lepsze. Co więcej, widoczność markerów jest na tyle większa, że możliwe jest zastosowanie znaczników o średnicy prawie dwukrotnie mniejszej, zachowując przy tym pełną widoczność bryły. Markery są przy tym trzykrotnie lżejsze, co znacząco redukuje narzut masy dla lekkiej jednostki latającej. Wyniki badań eksperymentalnych pokazały także, że możliwe jest uzyskanie lepszej widoczności markerów pasywnych przez osoby nieposiadające wiedzy eksperckiej w obszarze systemów MoCap. W pracach empirycznych związanych z inżynierią materiałową zrealizowano ponad 1500 eksperymentów. W oparciu o przebadane eksperymentalnie właściwości dostępnych na rynku materiałów retro-refleksyjnych wybrano materiał zapewniający lepszą widoczność markerów w porównaniu do widoczności uzyskiwanej w oparciu o fabryczne markery. Materiał umożliwia wykonanie płaskich markerów z dobrą widocznością w szerokim zakresie orientacji markera w stosunku do kamery. Pokazano, że dzięki takim materiałom czas lotu lekkich jednostek latających może być wydłużony prawie dwukrotnie. Część eksperymentalna jest mocną stroną rozprawy. Wyniki zaprezentowano w 9 tabelach oraz 29 wykresach prezentujących zależności. Uzyskane wyniki badań utwierdzają w przekonaniu, że hipotezy naukowe zostały potwierdzone eksperymentalnie. Należy przy tym stwierdzić, że badania zrealizowane zostały w sposób rzetelny, a cele pracy zostały osiągnięte.

4. Poniższe uwagi i pytania mają charakter dyskusyjny, nie są zarzutami i mają na ogół polemiczny, a nie krytyczny charakter, nie ujmujący przy tym wartości pracy. Uwagi te dotyczą także niejasnych sformułowań, błędów edytorskich, skrótów myślowych lub sformułowań zbyt ogólnych. Słabsze strony rozprawy są mniej istotne. W odniesieniu do charakterystyki systemów MoCap wartość pracy podniosłaby definicja śledzenia, w szczególności w odniesieniu do obiektu/markerów, także zdefiniowanie wektorów śledzenia oraz problemu odtwarzania trajektorii. W pracy nie przybliżono zagadnień związanych z kalibracją systemów wielokamerowych, w tym problemu triangulacji. W związku z powyższym w pracy zawarto mało precyzyjne sformułowania typu: „znacznik znajduje się na przecięciu wszystkich wyznaczonych wektorów”. W tym kontekście rodzi się pytanie, a jakie podejście należałoby zastosować, jeśli linie nie przecinają się w jednym punkcie 3D? W prezentacji Autorskiego mechanizmu wykrywania fałszywych znaczników brak jest odniesień do Rysunku 3.1 na którym zaprezentowano diagram przepływu danych w algorytmie. Nie wyjaśniono znaczenia symboli zamieszczonych na wspomnianym rysunku. Przed omówieniem Autorskiej metody automatycznego doboru czasu ekspozycji oraz progu detekcji kamer, która oparta jest na podejściu „dziel i zwyciężaj” w pracy zabrakło uzasadnienia dlaczego do rozwiązania problemu wybrano wspomniane podejście. W stopniu niewystarczającym odniesiono się do przyjętych założeń, w szczególności stałego wzmocnienia (ang. *fixed camera gain*), do wpływu zmiennych środowiskowych na wyznaczone wartości parametrów, np. wpływie zmian światła otoczenia,

przysłonięć, itp. Wymagane są dalsze doprecyzowania, w szczególności w kontekście zawartego w pracy sformułowania „Jako, że wstępują tutaj zależności liniowe, algorytm dziel i zwyciężaj wydaje się być odpowiedni z uwagi na niską złożoność obliczeniową.”, w tym odnoście złożoności obliczeniowej, rekurencji, alternatywnych podejść, itp. Pracy z pewnością nie zaszkodziłoby także szersze przedyskutowanie użyteczności markerów płaskich w zadaniach wykraczających poza zwis obiektu latającego, w tym także użyteczności wspomnianych markerów dla zwinnych dronów. Powyższe uwagi mają przede wszystkim charakter dyskusyjny i nie umniejszają w najmniejszym stopniu wartości rozprawy, która stanowi oryginalny wkład w dziedzinę robotyki.

Przy starannym przejrzaniu rozprawy dostrzegłem szereg błędów o charakterze edycyjnym. Przykładowe niedociągnięcia edycyjne: „masy nie wyższej”, „zapewniając czas śledzenia obiektu bliski 100%”, „Miarą prawdziwości jest odchylenie (ang. *bias*).”, „opisy poczynionych badań”, „dane ruchowe”, „Kamery podczerwieni to kamery, które rejestrują podczerwoną część spektrum ...”, „wyznaczany jest punkt środka, określony w trakcie definiowania bryły”, „aby w danym momencie co najmniej dwie z nich – o odpowiednio różnych kątach widzenia – obserwowały obiekt i możliwa była triangulacja jego położenia”, „poprawa procentowego pokrycia przestrzeni”, „wartość wskaźnika jest liczona”, „Diagram przepływu algorytmu”, „Współrzędne znacznika będą poza zakresem rozdzielczości kamery.”, „Ilość transmitowanych danych”, „dryf po rozgrzaniu systemu był relatywnie nieznaczny”, „Widoczne zjawisko dryfu”, „Dobór wartości ekspozycji jest bardzo ważny”, „16 punktów procentowych”. Odnosząc się do zależności (3.1) użyto zwrotu „wskazuje na czas” – powinno być „odsetek czasu”. W pracy nadużywano zwrotu „bazując na”, w niewłaściwym znaczeniu używano słowa „pozycjonowanie”, oraz „walidacja”.

5. Przetawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Marka Retingera proponuje wartościowe i oryginalne rozwiązania dla potrzeb konstrukcji i sterowania lekkich jednostek latających. Rozprawa potwierdza znaczącą wiedzę Doktoranta w obszarze robotyki, umiejętność samodzielnego prowadzenia prac badawczych, dokumentowania wyników badań naukowych oraz interpretacji wyników. Doktorant wykazał się znaczącą wiedzą w dziedzinie obiektów latających, dobrym opanowaniem warsztatu badawczego oraz umiejętnością prowadzenia badań naukowych. Recenzowana rozprawa jest wartościowym opracowaniem naukowym z wyraźnym komponentem eksperymentalnym. W podsumowaniu stwierdzam, że recenzowana rozprawa mgr. inż. Marka Retingera spełnia wszystkie wymagania ustawowe i zwyczajowe stawiane rozprawom doktorskim. Stwierdzam niniejszym, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska spełnia kryteria określone w art. 13 ust. 1 Ustawy. Wnoszę o dopuszczenie Pana mgr. inż. Marka Retingera do kolejnych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych. Ponadto, potencjał praktyczny zaprojektowanych i przebadanych eksperymentalnie rozwiązań, a w szczególności wartościowe rozwiązania dla potrzeb konstrukcji i sterowania lekkich obiektów latających zaproponowane w rozprawie, poparte dwiema współautorskimi publikacjami z wiodącym wkładem autorskim w czasopiśmie ze znaczącym IF są czynnikami przemawiającymi za wyróżnieniem rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Marka Retingera.

Boydous Kwalek