

Radom dnia 9.IX.2022r.

Dr hab. inż. Andrzej Puchalski, prof. UTH Radom  
Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu  
Wydział Mechaniczny  
Katedra Mechaniki Stosowanej i Mechatroniki

### Opinia

o rozprawie doktorskiej mgr. inż. Mateusza Kosiora

pt. „Model-Based Adaptive Path Planning Algorithm for Unmanned Aerial Vehicles”

Promotor: dr hab. inż. Piotr Przystałka, prof. PŚ.

Promotor pomocniczy: dr inż. Wawrzyniec Panfil

Podstawa prawna recenzji: Uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej z dnia 13 lipca 2022 roku.

#### 1. Uzasadnienie podjęcia tematu

Wybór tematyki pracy uzasadnia rosnąca popularność cywilnych aplikacji bezzałogowego statku powietrznego (BSP) o dużej długotrwałości lotu (ang. UAV High Altitude Long Endurance -HALE), zwłaszcza w Europie, w coraz większej liczbie dziedzin życia.

Praca jest bezpośrednio powiązana z projektem pt. „Long-endurance UAV for collecting air quality data with high spatial and temporal resolutions” (LEADER). Celem projektu jest opracowanie BSP typu HALE jako mobilnej platformy badawczej do rejestracji i pomiaru przestrzennego rozmieszczenia zanieczyszczeń atmosfery. Projekt realizowany w ramach programu Badania Stosowane finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Projekt jest prowadzony przez Politechnikę Śląską we współpracy z Norweskim Centrum Badawczym (NORCE, Norwegia), Uniwersytetem Warszawskim oraz SkyTech ELAB Sp. z o.o. (Polska). Projekt ma charakter multidyscyplinarny i obejmuje inżynierię i technologię mechaniczną oraz lotniczą. Misje prowadzone w ramach projektu są podzielone na dwie kategorie w zależności od regionu geograficznego. W ramach polskiej części projektu LEADER zadania dotyczą oceny osiągnięć BSP typu HALE i jego wyposażenia. Misje będą realizowane w wybranych regionach południowej Polski w zakresie badania rozkładu smogu w warstwie przyziemnej atmosfery (PBL) w zimnych porach roku, spalania biomasy i pyłu mineralnego w środkowej i górnej troposferze wiosną i latem i pionowego transportu aerozolu przez PBL.

Praca została napisana w ramach projektu SymIn – Symulacje w Inżynierii, realizowanego w ramach modułu V – Studia doktoranckie, zadanie 28 – Szkolenie interdyscyplinarne w Szkole Doktorskiej w ramach projektu Politechnika Śląska jako Centrum Nowoczesnej Edukacji.

Wynik pracy doktorskiej będzie wdrożony w postaci środowiska programistycznego do planowania misji BSP typu HALE w środowisku z ograniczeniami.

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 16.09.2022  
RDJMe/162/51/2022  
nr ..... zał. ....

## 2. Cel i zakres rozprawy

Celem pracy było zaprojektowanie i zweryfikowanie bazującego na modelu algorytmu adaptacyjnego planowania ścieżki do pobierania próbek zanieczyszczeń za pomocą autonomicznego BSP typu HALE, zaprojektowanego w ramach projektu LEADER.

Spełnienie wymagań projektu wymagało by tor lotu BSP poruszającego się w środowisku z ograniczeniami, w szerokim przedziale wysokości, od kilkuset metrów nad powierzchnią ziemi po dolną stratosferę, był zoptymalizowany pod kątem minimalnego wydatku energetycznego, a jednocześnie uwzględniał ograniczenia kinematyczne stałopłatu typu HALE.

## 3. Charakterystyka rozprawy

Recenzowana praca napisana jest w języku angielskim, liczy 136 stron, składa się z 6 rozdziałów, dodatków A i B oraz wykazu literatury zawierającego 130 pozycji. Doktorant jest autorem jednej publikacji, przyjętej do druku w roku 2022, spośród wymienionych pozycji. W pracy zamieszczono listę używanych symboli oraz wykaz wykorzystywanego sprzętu i oprogramowania. Układ rozdziałów i podrozdziałów jest przejrzysty. Pomijając drobne błędy jak np. użycie skrótu TS zarówno w odniesieniu do Twin Stratos jak i algorytmu optymalizacyjnego Tabu Search (str. 130), praca została przygotowana niezwykle starannie z edycyjnego punktu widzenia.

Rozdział 1. Autor wprowadza do tematyki naukowej oraz omawia założenia i misje badawcze, które mają być realizowane w Polsce i w Arktyce przez BSP typu HALE, projektowany w ramach projektu LEADER. W rozdziale tym sformułowane też wyżej podany cel i zasygnalizowano zakres pracy.

Rozdział 2. Opis podstaw modelowania bezzałogowych statków powietrznych obejmuje wprowadzenie do schematów wektorowych przedstawiających wpływ wiatru na lot stałopłatu, metody projektowania 2D i 3D trajektorii Dubinsa oraz różne warianty równań ruchu stosowane w kinematycznych i dynamicznych modelach nawigacji. Za optymalne rozwiązanie dla komputera pokładowego BSP typu HALE Autor uznał dynamiczny model nawigacji, który modeluje podstawową aerodynamikę, nie ograniczając całkowicie z wydajności obliczeniowej.

Rozdział 3. Przedstawiono koncepcję zautomatyzowanej metodyki budowania map środowiska dla każdej z czterech warstw: mapy terenu, mapy wiatru, mapy przestrzeni powietrznej i mapy pomiarowej modelującej rozkład zanieczyszczeń w celu optymalizacji ścieżki ruchu. Mapa otoczenia opisana w tym rozdziale była używana jako domyślny model sceny badawczej w trakcie badań symulacyjnych.

Rozdział 4. Zawiera formalny opis adaptacyjnego algorytmu planowania ścieżki lotu (APP). Rozwiązanie problemu poprzedza wyjaśnienie zastosowanej terminologii, metodologii i algorytmów. Tryb adaptacyjny (on-line) jest koniecznością wynikającą z faktu, że stany bezzałogowego statku powietrznego, a także jego otoczenie, nie są znane a priori i są nieprzewidywalne. System naprowadzania został wdrożony na komputerze jednopłytkowym Raspberry Pi, podczas gdy kontroler lotu BSP działał na module autopilota Pixhawk. Dwuetapowy algorytm APP, tworzą planer globalny (GPP) oraz planer lokalny (LPP).

GPP może realizować algorytm optymalizacji w celu rozwiązania wielokryterialnego problemu zapewnienia wykonalnej ścieżki zoptymalizowanej pod kątem minimalnych wydatków na energię. Jako rozwiązanie alternatywne zaproponowano metodę globalnych kryteriów do przekształcenia wielokryterialnej funkcji kosztu w jednocelową. GPP optymalizuje tylko punkty orientacyjne, które działają jako punkty kontrolne. Następnie punkty te są łączone za pomocą ścieżek Dubinsa i tworzą gładką, kinematycznie wykonalną ścieżkę. Jako kryteria wykorzystywane w algorytmie przyjęto unikanie przeszkód oraz opcjonalnie: długość ścieżki, wpływ wiatru, wydatek energii i stężenie zanieczyszczeń. Kryteria zdefiniowano tak, że dają wartość liczbową odwrotnie proporcjonalną do optymalności rozwiązania według określonego kryterium. W pracy stosowano różne algorytmy heurystyczne, poszukiwania globalnego minimum funkcji czerpiące inspiracje z procesów naturalnych, takie jak algorytm szarych wilków (I-GWO), algorytm roju cząstek (PSO), algorytm genetyczny (GA) czy algorytm kolonii mrówek (ACS). Algorytmy zostały wybrane na podstawie ich dostępności w środowisku MATLAB. Algorytmy opisano w dodatku B3.

GPP zaplanowano dla naziemnej stacji kontroli, LPP może być wykorzystywane także na pokładzie. GPP dąży do optymalizacji ścieżki, LPP koncentruje się na szybkości reakcji, prostocie i minimalnych kosztach obliczeniowych. Zadaniem LPP jest zapewnienie bezkolizyjnej ścieżki 3D Dubinsa od aktualnej pozycji BSP do następnego punktu trasy dostarczonego przez GPP, przy dostosowaniu się do ograniczeń kinematycznych stałopłatu. W związku z tym LPP wykorzystuje opisane w dodatku B2 szybkie algorytmy stochastyczne planowania ścieżki 3D takie jak algorytm eksplorowania drzew losowych RRT lub jego zmodyfikowana wersja RRT\* i zapewnia ścieżkę w sytuacjach awaryjnych. Umożliwia powrót do punktu startu oraz powrotu BSP do punktu lądowania awaryjnego, po utracie komunikacji ze stacją kontroli naziemnej (SKN). W rozdziale wskazano na znaczenie symulacji bazującej na modelu w walidacji ścieżki przed jej ostatecznym zatwierdzeniem.

Rozdział 5. Stanowi najobszerniejszą część rozprawy, w której opisano testy weryfikacyjne przeprowadzane w celu oceny APP. Oba algorytmy GPP i LPP zostały zaimplementowane w MATLAB R2022a i zweryfikowane w symulacjach Model in-the-Loop, w których wykorzystano modele BSP i otoczenia.

W badaniach weryfikacyjnych, symulacjach wykorzystano uproszczone kinematyczne i dynamiczne modele naprowadzania opisane w rozdziale 2. Modele naprowadzania zostały skonfigurowane zgodnie z parametrami mechanicznymi BSP typu HALE, zaprojektowanego w ramach projektu LEADER. Zdefiniowano ogólne miary ścieżki (długość, gładkość, liczba punktów, liczba punktów kolizyjnych, czas lotu, złożoność obliczeniowa) oraz miary charakterystyczne dla algorytmów GPP i LPP. Zestaw metryk planera globalnego GPP, dotyczący w szczególności problemu optymalizacji ścieżki globalnej zdefiniowano w celu opisanego danych zwracanych przez algorytm (całkowita liczba wywołań funkcji kosztu podczas pojedynczej sesji optymalizacji, koszt numeryczny, wydatek energetyczny). Metryki planera lokalnego LPP uwzględniają określone parametry podstawowych algorytmów planowania ścieżki metodą drzew losowych RRT. W planie badań weryfikacyjnych algorytmu planowania ścieżki APP uwzględniono weryfikację zastosowanych modeli otoczenia, wiatru i nawigacji, niezależne walidacje GPP i LPP i testy złożone APP na dwóch rzeczywistych scenariuszach misji pomiarowych: profilowanie smogu nad Żywcem oraz pomiary atmosferycznej sadzy (BC) w Arktyce.

Dodatek A. Podaje podstawowe terminy i definicje wykorzystywane w rozprawie.

Dodatek B. Jest to przegląd znanych strategii sterowania i algorytmów planowania ścieżki dla obiektów autonomicznych oraz heurystycznych i meta-heurystycznych algorytmów optymalizacyjnych zarówno inspirowanych jak i nieinspirowanych naturą.

#### **4. Ocena metodyki i programu badań**

W opiniowanej rozprawie doktorskiej wyróżniam wymienione niżej etapy:

-dokonanie analizy stanu wiedzy z zakresu budowy i projektowania bezzałogowych statków powietrznych (BSP) o dużej długotrwałości lotu jako mobilnej platformy badawczej do rejestracji i pomiaru przestrzennego rozmieszczenia zanieczyszczeń atmosfery,

-opracowanie algorytmu adaptacyjnego planowania ścieżki do pobierania próbek zanieczyszczeń za pomocą autonomicznego BSP typu HALE, zaprojektowanego w ramach projektu LEADER,

- przeprowadzenie badań porównawczych algorytmów planujących oraz dostrojenie kluczowych parametrów wybranych algorytmów.

Opracowanie algorytmu i przeprowadzenie jego symulacyjnej weryfikacji stanowi najważniejsze osiągnięcie naukowe doktoratu.

Praca ma charakter projektowy, bazujący na metodach symulacji komputerowych, dominują w niej zagadnienia inżynierii i technologii mechanicznej powiązanej z inżynierią lotniczą. Przeprowadzone badania mają charakter nowatorski.

Algorytmy mogą być badane z teoretycznego lub praktycznego punktu widzenia. Ze względu na specyfikę zagadnienia i aktualny stan zaawansowania prac nad BSP typu HALE w ramach szerszego projektu LEADER Autor zdecydował się na weryfikacje i strojenie realizowane symulacyjnie.

Wnioski wyciągnięte przez Autora odzwierciedlają całość ważniejszych wyników przeprowadzonych badań.

W badaniach weryfikacyjnych planera ścieżek LPP wykorzystywano trzy różne algorytmy losowych drzew oparte na RRT. Dla kilku losowo generowanych konfiguracji sceny, testy wskazały RRT\* jako optymalne rozwiązanie. RRT\* został skalibrowany i zweryfikowany w trzech rzeczywistych scenariuszach lotu, które wymagały dynamicznego ponownego planowania. Testy wskazały na niespójność wyników jako główną wadę algorytmów RRT.

W algorytmach optymalizacyjnych wykorzystywano swoje ustawienia domyślne lub dokonywano ich doboru empirycznie metodą prób i błędów dla przykładowej mapy, dopóki algorytm nie zaczął zbliżać się do optymalnego rozwiązania. Algorytmy zostały przetestowane przy użyciu równych wag poszczególnych kryteriów. Prowadzone przez Autora testy symulacyjne i analiza porównawcza algorytmów optymalizacji w założonej scenie testowej wykazały wyższość algorytmu ACOR, wskazując jednocześnie na jego główną wadę jaką jest stosunkowo duża zmienność wyników. Autor uznał algorytm GA za preferowany, ze względu na odporność, w przypadku braku nadzoru człowieka, algorytm PSO za najbardziej wszechstronny, wart rozważenia w przyszłych badaniach.

Czy rezygnacja z klasycznych algorytmów optymalizacji uzasadniona stwierdzeniem ich dużych kosztów obliczeniowych, było konsekwencją analiz testów wykonanych przez Autora?

Algorytm aplikacji APP osiągnął wskaźnik sukcesu (success ratio) wyliczony przez Autora na poziomie od 83,33% do 100%, w zależności od przypadku użycia. Aplikacja ma być wykorzystywana jako narzędzie wspomagające osoby planujące misje, więc niewielka część nieoptymalnych rozwiązań nie stanowi problemu dopóty, dopóki aplikacja nie będzie traktowana jako autonomiczna.

Biorąc pod uwagę wyniki przeprowadzonych badań porównawczych algorytmów wykorzystywanych przez LPP (RRT, RRT\* i BiRRT) oraz algorytmów jednokryterialnej optymalizacji globalnej, z których korzystał GPP (I-GWO, ACOR, PSO i GA) należy uznać, że Autor zrealizował cel i zakres pracy, jakim było opracowanie adaptacyjnego algorytmu planowania ścieżki do pobierania próbek zanieczyszczeń za pomocą autonomicznego BSP typu HALE.

Autor nie korzystał w badaniach z klasycznych funkcji typu benchmark, testujących zachowanie algorytmów optymalizacyjnych. Czym było to podyktowane? Czy testy, w połączeniu z odpowiednio dobranym zestawem analiz statystycznych wyników, mogłyby być źródłem informacji i dalszych wniosków przydatnych na etapie wdrażania zaproponowanych planerów misji BSP typu HALE?

Dorobek użytkowy pracy jest znaczący, natomiast jego skala może być potwierdzona dopiero po zbudowaniu BSP. W trakcie realizacji pracy nie był także dostępny kompletny dynamiczny model docelowego BSP HALE.

## **5. Wniosek końcowy**

Podjęta tematyka BSP klasy HALE latających autonomicznie w środowisku z ograniczeniami jest niezwykle istotna i aktualna. Doktorant wykazał się szerokim zakresem wiedzy. Potwierdził umiejętność korzystania z literatury naukowej, poprawnego wnioskowania oraz tworzenia i weryfikacji wyników programu badawczego. Praca zawiera rozwiązanie postawionego problemu naukowego. Praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w dyscyplinie inżynierii mechanicznej.

Podsumowując niniejszą recenzję pracy doktorskiej Pana mgr inż. Mateusza Kosiora wykonanej pod opieką promotora Pana dr hab. inż. Piotra Przystałki, prof. PŚ i promotora pomocniczego Pana dr inż. Wawrzyńca Panfila stwierdzam, że praca doktorska spełnia wymagania określone w Ustawie (z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668 ze zm.) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Pana mgr inż. Mateusza Kosiora do publicznej obrony.

