

Prof. dr hab. inż. Wojciech Batko
Karpacka Państwowa Uczelnia w Krośnie

Kraków, 2022-08-03.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Kosiora
pt. „Model-Based Adaptive Path Planning Algorithm for Unmanned Aerial Vehicles”
„Adaptacyjny algorytm planowania ścieżki lotu bezzałogowych statków powietrznych
wsparty modelem”

Promotor pracy : dr. hab. inż. prof. PŚl. Piotr Przystałka.

Promotor pomocniczy ; dr inż. Wawrzyniec Panfil

Podstawa prawna oceny : Pismo RDIME.512.19.2022, Przewodniczącej Rady dyscypliny Inżynieria
Mechaniczna Politechniki Śląskiej, prof. dr hab. inż. Ewy Majchrzak z dnia 13.07.2022 r.

1. Ocena problematyki rozprawy.

Problemy badawcze związane z budową systemów pomiarowych bezzałogowych statków powietrznych (BSP) należą do grupy zagadnień badawczych ciągle rozwijanych w licznych ośrodkach naukowo-badawczych w kraju i zagranicą. Mają duży obszar potrzeb aplikacyjny rozpoznanych z potrzebami zapewnienia ich jakości i niezawodnego funkcjonowania, przy realizacji pomiarów w szerokim zakresie uwarunkowań eksploatacyjnych. W szczególności, dotyczyć one mogą wymagań związanych z ich funkcjonowaniem na określonych wysokościach przelotu; (*od kilkuset metrów nad powierzchnią ziemi, aż po dolną stratosferę*); a także w warunkach długotrwałości przebywania w powietrzu.

Podjęte z tego obszaru w rozprawie przez Doktoranta zadanie badawcze ukierunkowane zostało - na opracowanie adaptacyjnego algorytmu planowania ścieżki przelotu ścieżki APP; (*ang. Adaptive Path Planner*) bezzałogowych statków powietrznych BSP klasy HALE ; (*latających autonomicznie*); - przy próbkowaniu zanieczyszczeń w środowisku, przy uwzględnieniu obecnych w ich realizacjach charakterystycznych ograniczeń.

Oczekiwane rezultaty wiązać należy z opracowaniem narzędzi i wskazań projektowych do weryfikacji poprawności działania systemu wzorcowej konstrukcji APP, umożliwiającego dynamiczne przeliczanie ścieżki przelotu podczas gdy BSP jest w powietrzu, przy uwzględnieniu możliwości dostosowania ścieżki do zmieniających się parametrów misji, np. warunków pogodowych bądź pojawiania się nowych przeszkód.

Rozprawa porusza wiele zagadnień z zakresu inżynierii mechanicznej, tj. : kwestie formalnego opisu nowatorskiego, adaptacyjnego algorytmu planowania ścieżki przelotu, uwzględniającego zagadnienia: modelowania BSP, optymalizacji pod kątem minimalnego szacowanego wydatku energetycznego, modelowania BSP i jego otoczenia, a także studium przypadku, w którym wykorzystano metodę *Model-in-the-Loop* (MIL).

Podjęcie tego tematu oceniam jednoznacznie pozytywnie. Z punktu widzenia walorów poznawczych i praktycznych recenzowana praca doktorska i jej problem badawczy **jest poznawczo niezmiernie ważny i aktualny.**

Spełnia oczekiwania jakie wiązać można z tematem pracy doktorskiej. Jest on atrakcyjny aplikacyjnie i naukowo, dobrze wkomponowując się w współczesne potrzeby i trendy badawcze, związane z

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 11.08.2022
RDIME/52154/2022
nr zał.

poszukiwaniami nowych rozwiązań sterujących lotem bezzałogowych statków powietrznych (BSP), umożliwiającymi dynamiczne przeplanowywanie (korektę) ich trajektorii przelotu.

2. Analiza zawartości rozprawy.

Przechodząc do ogólnej charakterystyki rozprawy mgr inż. Mateusza Kosiora stwierdzam, że opiniowana praca doktorska stanowi bardzo obszerne analityczno-eksperymentalne studium problemu budowy adaptacyjnego planera APP trajektorii przelotu bezzałogowego statku powietrznego (BSP), w odniesieniu do jego zastosowania w zadaniach próbkowania zanieczyszczenia powietrza z wykorzystaniem stałopłatu klasy HALE.

Ma ona udokumentowanie na 136 stronach. Jej zawartość jest określona: 6 rozdziałami, 55 ilustracjami rysunkowymi, 29 tabelami. Całość uzupełnia: wykaz 130 odnośników literaturowych do treści pracy, streszczenia (w jez. polskim i angielskim), spis oznaczeń oraz dodatki A i B. Dodatek A zawiera prezentację wybranych definicji i pojęć istotnych z punktu widzenia pracy. Obejmują one definicje m.in. pojęć związanych z planowaniem ścieżki przelotu, szeroko pojętą optymalizacją oraz autonomią. Dodatek B zawiera analizę stanu wiedzy w zakresie różnorodnych algorytmów planowania ścieżki przelotu oraz opis algorytmów optymalizacji globalnej. Część pierwsza poświęcona jest dokładnym algorytmom planowania, w tym algorytmowi Dijkstry, A* i D*, oraz algorytmom stochastycznym RRT i RRT*. Poza rysem historycznym oraz zasadniczym opisem każdego z algorytmów, przedstawione zostają ich wybrane przypadki użycia w kontekście BSP. Część druga opisuje cztery wybrane algorytmy optymalizacji globalnej (GA, PSO, ACO and I-GWO). Podobnie jak w części pierwszej, opis algorytmów uzupełniają przykłady ich zastosowania w zadaniach BSP.

Rozdział 1 rozprawy doktorskiej stanowi wprowadzenie do problemu naukowego poruszonego w pracy, przedstawia jej motywację oraz jego podłoże naukowe jej podjęcia. Umiejscawiają ideę programową rozprawy w tle zadań powiązanych z realizacją międzynarodowego projektu LEADER (*ang. Long-endurance UAV for collecting air quality data with high spatial and temporal resolutions*), dedykowanemu pomiarom zanieczyszczenia powietrza z wykorzystaniem autonomicznego BSP klasy HALE. Opisuje podstawowe zagadnienia związane z pomiarami zanieczyszczenia powietrza oraz wybrane scenariusze pomiarowe, których realizacja ma kluczowe znaczenie w dalszych etapach realizacji pracy doktorskiej. Punktuje główne zadania badawcze podjęte w pracy. Skupia uwagę na: potrzebie opisu formalnego modelu środowiska i algorytmu APP, sformułowaniu zadania optymalizacji przy jego realizacji oraz nakreślenie warunków weryfikacji uzyskanych wyników badawczych.

Rozdział 2 analizuje podstawowe zagadnienia związane z modelowaniem bezzałogowego stałopłatu, takie jak układy odniesienia stosowane w modelowaniu statków powietrznych, czy trójkąt wiatru. Omawia koncepcje dwu- i trójwymiarowych ścieżek Dubinsa z wyszczególnieniem wybranych przykładów ich zastosowania do planowania ścieżki przelotu stałopłatów. Prezentuje również kilka uproszczonych modeli stałopłatu, w tym cztery modele kinematyczne i jeden dynamiczny. Zaznacza potrzebę opracowania; w ramach projektu LEADER przez inny zespół, pełnego nieliniowego modelu dynamicznego stałopłatu HALE.

Rozdział 3 opisuje koncepcję przestrzennej mapy środowiska, która modeluje kluczowe komponenty sceny. Do opisu sceny wykorzystane są cztery rodzaje modeli (map). Mapa rzeźby terenu określająca ukształtowanie terenu, niezbędną w planowaniu ścieżek omijania naturalnych przeszkód terenowych. W pracy są prezentowane jej trzy warianty. Opisany za pomocą wokseli, wariant dyskretny, oraz model ciągły i dyskretny. Są one opisane poprzez powierzchnię rozpiętą pomiędzy spróbkowanymi punktami pomiarowym odpowiadającymi wysokości terenu. Mapa prognozowanej prędkości wiatru niezbędna przy optymalizacji ścieżki przelotu statku powietrznego. Mapa opisana jest przez 3 wymiary przestrzenne oraz jeden wymiar czasowy. Podobnie, jak w

przypadku mapy rzeźby terenu, opisane zostają dwa warianty mapy – ciągły i dyskretny. Mapa struktury przestrzeni powietrznej odwzorowuje wszelkie przeszkody niewynikające bezpośrednio z ukształtowania terenu. Obejmuje ona między innymi strefy objęte prawnym zakazem lotu (ang. No-Fly Zones, NFZs), fizyczne przeszkody (np. budynki) oraz niebezpieczne warunki atmosferyczne, np. chmury burzowe. Mapa pomiarowa stanowi niezbędny model środowiska i reprezentuje prognozowaną dystrybucję zanieczyszczenia, co umożliwi optymalizację przyszłej strategii pomiarowej. Mapa ta może być uaktualniana rzeczywistymi danymi pomiarowymi. Zawarte w tym rozdziale komentarze i analizy służą właściwemu wyartykułowaniu realizacji celu podjętego zadania badawczego, wypunktowaniu potrzeby poszukiwań autorskich ich modyfikacji.

Rozdział 4 zawiera formalny opis opartego na modelu BSP algorytmu APP oraz jego najważniejszych komponentów. Rozdział rozpoczyna się od wyjaśnienia pojęcia adaptacyjnego planowania ścieżki przelotu BSP stanowiącego temat przewodni rozprawy. W dalszej części opisana jest ogólna postać APP z zaznaczeniem roli podejścia opartego na modelu BSP. Następnie przedstawione zostają dwa najważniejsze komponenty APP: planer globalny (ang. *Global Path Planner*, GPP) oraz planer lokalny (ang. *Local Path Planner*, LPP). Pierwszy z wymienionych komponentów, GPP, wykorzystuje algorytmy optymalizacji globalnej do rozwiązania problemu optymalizacji wielokryterialnej, który dalej zostaje sprowadzony do optymalizacji jednokryterialnej. Problem ten związany jest ze znalezieniem bezkolizyjnej ścieżki przelotu BSP optymalnej pod względem minimalnego zużycia energii. W kolejnych podrozdziałach opisane są kryteria optymalizacji oraz ich wpływ na kształt docelowej ścieżki. Dalej, w analogiczny sposób przedstawiony jest LPP. W przeciwieństwie do GPP wykorzystuje on algorytmy stochastyczne, które pozwalają na szybkie przeliczenie ścieżki lotu, np. w przypadku zerwania komunikacji ze stacją kontroli naziemnej. Ścieżka generowana przez LPP musi być bezkolizyjna i zgodna z ograniczeniami kinematycznymi BSP. Jednak w odróżnieniu od ścieżek globalnych generowanych przez GPP, ścieżki lokalne nie są optymalizowane, co pozwala na ich szybsze generowanie oraz ogranicza zapotrzebowanie na moc obliczeniową. W miejscu tym miejscu rozprawy ma miejsce prezentacja **nowej bazy wiedzy** pomocnej w procesie konstrukcji planera ścieżki lotu BSP..

Rozdział 5 opisuje badania weryfikacyjne. Rozdział rozpoczyna krótki opis BSP wykorzystywanego podczas badań poprzedzony weryfikacją modeli środowiska i BSP. Następnie przedstawiona zostaje szczegółowa analiza algorytmów GPP, LPP oraz APP. W ramach badań wstępnych porównane zostają opisane warianty implementacyjne mapy rzeźby terenu. Przetestowane zostaje także działanie mapy prognozowanej prędkości wiatru przez porównanie wyników z danymi pozyskanymi bezpośrednio z darmowych serwisów pogodowych. Dalsza część rozdziału poświęcona jest raportowaniu rezultatów badań zasadniczych. Badania rozpoczyna niezależna weryfikacja działania każdego z kryteriów optymalizacji globalnej wykorzystywanej w GPP. Następnie, przy wykorzystaniu symulacji MIL, porównane zostają wybrane algorytmy optymalizacji jednokryterialnej, po czym wyłoniony zostaje algorytm optymalny. Kolejna część poświęcona jest weryfikacji LPP, w tym porównaniu różnych algorytmów stochastycznych z rodziny RRT (ang. *Rapidly-exploring Random Tree*). Analizę wyników kończy wybór optymalnego algorytmu planera lokalnego. Algorytm ten zostaje następnie skalibrowany i zweryfikowany w symulacji wybranych scenariuszy wymagających dynamicznego przeplanowania ścieżki w trakcie lotu BSP. Ostatnia część badań opisuje walidację APP rozumianego jako połączenie GPP i LPP na przykładzie dwóch wybranych misji, wzmiankowanych w projekcie LEADER. Oba przypadki użycia dotyczą zadania próbkowania zanieczyszczenia powietrza. Pierwszy z nich poświęcony jest pomiarowi smogu nad miastem Żywiec, natomiast drugi dotyczy pomiarów sadzy (ang. *Black Carbon*, BC) nad archipelagiem Svalbard w Norwegii. W istotnym zakresie prezentowane w tym rozdziale treści są syntezą szeregu prac, w których uczestniczył Doktorant.

Prezentowane w tym rozdziale badania Doktoranta określiły **opracowaną przez niego, nową bazę wiedzy** pomocną w budowie APP, która jest istotnym, nowatorskim rezultatem rozprawy.

Rozdział 6 zawiera podsumowanie dokonań rozprawy. Przedstawia listę sformułowanych na ich podstawie wniosków. Kreśli ponadto koncepcję dalszych prac rozwojowych nad opracowanym algorytmem.

Podsumowując ten punkt recenzji można stwierdzić, że tytuł rozprawy doktorskiej został sformułowany w zrozumiałym sposobie, a jej treści w pełni korespondują z tytułem pracy. Zrealizowane i udokumentowane w rozprawie doktorskiej poszukiwania badawcze Autora: skalą złożoności podjętych zadań i realizacją wykonanych prac: analitycznych, eksperymentalnych, a także przekazem nowych idei konstrukcji budowy adaptacyjnego planera APP ścieżki przelotu bezzałogowego statku powietrznego (BSP), do próbkowania zanieczyszczenia powietrza z wykorzystaniem stałopłatu klasy HALE **w pełni wypełniają wymogi stawiane rozprawom doktorskim.**

3. Ocena merytoryczna.

Przechodząc do oceny merytorycznej pracy i sposobu rozwiązania problem badawczego już na wstępie chciałbym podkreślić, że rozprawa mgr inż. Mateusza Kosiora stanowi bardzo wartościową naukową pozycję będącą ważnym źródłem informacji, która w moim przekonaniu znajdzie liczne grono odbiorców wśród osób zajmujących się konstruowaniem systemów pomiarowych i sterujących BSP.

Temat pracy można uznać za rozwiązany; *(na etapie zadania doktorskiego)*; w pełni oczekiwaną od niego problemową dociekliwością. Poszczególne rozdziały rozprawy referują w przekonujący, konsekwentny sposób tok myślowy Doktoranta. Ma on odniesienia w zrealizowanym oryginalnym, projekcie i jego weryfikacji. Prezentuje opracowany przez Doktoranta adaptacyjny algorytm planowania ścieżki BSP klasy HALE; *(latającego autonomicznie w środowisku z ograniczeniami) przeznaczony do próbkowania zanieczyszczeń.*

Rozprawa swoimi treściami przekazuje one **nowe wskazania metodyczne oraz informacje wykonawcze** dla procesów budowy adaptacyjnego planera APP ścieżki przelotu bezzałogowego statku powietrznego (BSP). Mają one **istotną wartość poznawczą** dla dziedziny wiedzy jaką jest inżynieria mechaniczna.

Do istotnych rezultatów rozprawy doktorskiej zaliczam :

- opracowanie; *(na bazie obszernego, autorskiego materiału analitycznego i eksperymentalnego)*; nowej bazy wiedzy pomocnej przy budowie adaptacyjnego planera APP bezkolizyjne ścieżki przelotu BSP;
- podanie wskazań metodycznych i wzorców wykonawczych do budowy adaptacyjnego algorytmu APP, z uwzględnieniem warunków optymalizacji jedno- i wielokryterialnej, łączącej warunki omijanie przeszkód, minimalizację zużycia energii, przyjętą strategię pomiarową oraz więzami kinematycznymi statku powietrznego ;
- rozpoznanie właściwości metod obliczeniowych czterech wybranych algorytmów optymalizacji jednokryterialnej (I-GWO, ACO_R, PSO and GA) wykorzystywanych przez GPP do znalezienia optymalnej energetycznie ścieżki przelotu (rozdział 5) oraz trzech wybranych algorytmów z rodziny RRT (RRT, RRT*, BiRRT) wykorzystywanych przez LPP do szybkiego przeliczania uaktualnionej ścieżki przelotu (rozdział 5).
- opracowanie modelu środowiska, odzwierciedlającego kilka istotnych aspektów sceny tj.: rzeźby terenu, prognozowanej prędkości wiatru, struktury przestrzeni powietrznej oraz strategię pomiarową (rozdział 3);
- prezentację wyników szczegółowe badań symulacyjnych algorytmu APP i jego komponentów z wykorzystaniem metody MIL na przykładzie kilku wybranych przypadków użycia inspirowanych projektem LEADER (rozdział 5).

Te wyróżniki rozprawy doktorskiej, mogą być źródłem informacji i inspiracją do dalszych rozwinięć i aplikacji opracowanej i wskazanej przez Autora drogi, przy budowie adaptacyjnego planera APP bezkolizyjne ścieżki przelotu BSP.

Mam świadomość, że w edycji obszernego materiału badawczego Doktoranta zawsze może pojawić się pewien niedosyt u czytelnika. Dotyczy on może mało widocznej w realizowanych rozpoznaniach badawczych Kandydata oceny palety możliwych błędów w procesie badawczym, analizy niepewności uzyskanych rezultatów. Uwaga ta dotyczy kwestii: zarówno oceny możliwych błędów w odniesieniu do realizowanych eksperymentów pomiarowych, jak i stosowanych przetworzeń numerycznych. Widziałbym celowość wypunktowania w pracy, stowarzyszonych z przyjętym formalizmem modelowym możliwych ograniczeń, warunkowanych koniecznością wypełnienia określonych założeń.

Mam nadzieję, że Autor weźmie tą kwestię pod uwagę w swoich dalszych pracach badawczych, co pozwoli na pełniejsze udokumentowanie i ocenę wiarygodności uzyskanych rozpoznań badawczych.

Reasumując stwierdzam, że zarówno wyniki poznawcze, jak i praktyczne dokonania Doktoranta zasługują na w pełni pozytywną opinię. Dotyczą one zagadnień perspektywicznych, o istotnych rezultatach naukowych, jak i aplikacyjnych. Można uznać, że stanowią one istotny **wkład informacyjny mgr inż. Mateusza Kosiora w rozwój aktualnej wiedzy** dotyczącej budowy adaptacyjnych planerów ścieżki lotów BSP.

4. Konkluzja.

Biorąc pod uwagę omówione i ocenione wyżej rezultaty rozprawy doktorskiej pracy mgr inż. Mateusza Kosiora stwierdzam, że rozwiązał pewien istotny obszar ważnych aplikacyjnie i naukowo zadań badawczych, dotyczących planowania ścieżki próbkowania zanieczyszczeń powietrza za pomocą BSP klasy HALE, latającego autonomicznie w środowisku przy określonych ograniczeniach.

Wyniki te w pełni spełniają wymagania stawiane przez obowiązującą *Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dziennik Ustaw 2018 poz. 1668 ze zm.)*.

W mojej opinii, wypracowany przez Doktoranta przekaz nowej wiedzy **nie miał** dotychczas należytego miejsca w przekazie literaturowym. Jego powiązanie z ich aplikacją zadaniową w międzynarodowym projekcie LEADER skłania mnie do przypisania rozprawie atrybutu wyróżniającej.

Wymienione wyżej konkluzje upoważniają mnie do opowiedzenia się za przyjęciem rozprawy i skierowaniem jej do dalszego procedowania.

Dojciech Bałko