

Prof. dr hab. inż. Zdzisław Gosiewski
tel. 606-483601

Opacz Kolonia, 31.08.2023 r.

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Recenzja

Wpłynęło dnia 1.09.2023 ..r.kh.

rozprawy doktorskiej **mgra inż. Grzegorza Suchanka** pt.
"**Budowa i algorytmy sterowania inspekcyjnego robota latającego**"

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Andrzej Gołaś

Promotor pomocniczy: dr inż. Wojciech Ciesielka

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Zarejestrowano pod nr
Podpis dm

Podstawa prawna: Zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, AGH Kraków - dra hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH - z dnia 6.07.2023 r.

Lokalizacja tematyki rozprawy w technice

Od pierwszego lotu braci Wright, prekursorów lotnictwa, minęło 120 lat. W tym czasie powstało wiele rodzajów i typów statków powietrznych. Istotną grupę stanowią śmigłowce, które nie wymagają rozbudowanych lotnisk i potrafią realizować zadania w zawisie. Od 30 lat coraz ważniejszą rolę zaczynają odgrywać bezzałogowe statki powietrzne, zwane powszechnie dronami. Ilościowo wśród dronów dominują małe śmigłowce wielowirnikowe, opracowane po raz pierwszy w zespole prof. Siegwarta z ETH w Zurichu. Dzięki miniaturyzacji wyposażenia pokładowego, braku człowieka na pokładzie, maszyny te są pomniejszane i masowo produkowane, a przez to tanieją i stają się powszechnie dostępne. Rośnie liczba ich zastosowań zarówno wojskowych jak i cywilnych. O ile system sterowania śmigłowcami wielowirnikowymi o napędach działających równolegle został dobrze opracowany i oprzyrządowany, to ich stosowane aplikacje wymagają zaprojektowania i uzupełnienia wyposażenia pokładowego, naziemnego i informatycznego. Do podstawowych zadań małych śmigłowców wielowirnikowych należą zadania obserwacji tego co dzieje się na ziemi oraz identyfikacji źródeł niepożądanych zjawisk generowanych przez przyrodę lub ludzi. W tym kierunku, a konkretnie na potrzeby badania stanu atmosfery i poszukiwania źródeł jej zanieczyszczenia, Doktorant podjął stosowne działania projektowe i badawcze oraz opisał je w swojej rozprawie.

Krytyczne omówienie zawartości pracy

Rozprawa, napisana w języku polskim, liczy 236 stron, składa się z 7 rozdziałów, 4 dodatków, bibliografii (235 pozycji), streszczeń w języku angielskim i polskim oraz spisu skrótów. Brakuje spisu oznaczeń zmiennych i stałych. Ale, prawdopodobnie, nie można było tego zrealizować dla całej pracy, gdyż w poszczególnych rozdziałach oraz dodatkach czego innego te same oznaczenia dotyczą.

Celem pracy doktorskiej jest zbudowanie i przebadanie latającego robota inspekcyjnego analizującego stan zanieczyszczenia wybranego obszaru powietrza cząsteczkami stałymi i ewentualnego poszukiwania źródła generującego te zanieczyszczenia. Wielkość obszaru badanego oraz ocena proponowanej metody przeszukiwania związane są z ograniczonym czasem lotu, co wynika z posiadanych zasobów energetycznych latającej maszyny. Główny wysiłek badawczy Autora rozprawy ukierunkowany został więc na taką budowę systemu pomiarowego i wdrożenie takich metod przetwarzania zbieranych danych, aby w jak najkrótszym czasie zrealizować zadanie

- /

inspekcyjne. Jest to możliwe do zrealizowania w czasie jednego lotu pod warunkiem, że zadanie jest realizowane metodą zaawansowanej autonomii. W tym też kierunku podążał mgr inż. Grzegorz Suchanek w swoich działaniach projektowych, laboratoryjnych i informatycznych. Autonomię realizował przede wszystkim poprzez stosowne oprogramowanie realizowanych pomiarów i przetwarzanie zebranych danych pomiarowych już w trakcie lotu.

W obszernym wprowadzającym **rozdziale 1** prezentowany jest przede wszystkim duży już stan wiedzy z tematyki związanej z celem rozprawy doktorskiej. Omawiane są rozwiązania pomiarowe stosowane do zbierania informacji o stanie środowiska z wykorzystaniem statków powietrznych. Prezentowane są nie tylko rozwiązania konstrukcyjne systemów pomiarowych, ale również metody modelowania przemieszczania się cząstek zawieszonych w powietrzu oraz metody poszukiwania źródeł zanieczyszczenia. Ten obszerny przegląd literatury jest, z punktu widzenia Czytelnika, dosyć chaotyczny, ale zapewne dostarczył Autorowi stosownej wiedzy niezbędnej w jego działaniach. W analizach literatury ostatecznie koncentrował się na tych rozwiązaniach, które dotyczą zanieczyszczeń w postaci cząstek stałych, a źródło zanieczyszczenia poszukiwane jest przez latający robot wyposażony jedynie w czujnik PM (ang. *particulate matter*). Tymczasem w praktyce do poszukiwania tych źródeł wykorzystuje się szeroko również kamery na podczerwień, stacjonarne czujniki PM, a nawet sztuczne satelity. Zabrakło mi odniesienia do tych innych możliwości pomiarowych, czy możliwości współpracy różnych rozwiązań sprzętowych i programowych.

W **rozdziale 2** opisane są zagadnienia i problemy związane z wyborem rozwiązania konstrukcyjnego i sterowaniem śmigłowcami wielowirnikowymi o równoległej strukturze napędów. Takie napędy generują równoległe aerodynamiczne siły sterujące. Zbudowany został model matematyczny ruchu takich śmigłowców oraz jego stosowny model symulacyjny w pakiecie programów Matlab. Śmigłowiec jako sztywna bryła w powietrzu ma sześć stopni swobody, Należałoby więc niezależnie sterować sześcioma składowymi ruchy, ale nie jest to możliwe dla układu równoległych sił sterujących, bez względu na ich ilość. Takie obiekty określa się jako niedosterowane (ang. *under-actuated*). Dlatego w zawisie, przy bocznym wietrze, układ sterowania będzie starał się utrzymać pozycję przez odpowiedni obrót śmigłowca, co również zmieni lokalizację wyposażenia pokładowego (również kanału wlotowego do czujnika) względem przyjętych kierunków pomiarowych. Nie znalazłem rozwiązania tego problemu w dalszych rozdziałach pracy. W dalszej części tego rozdziału Doktorant przedstawia próbę zaprojektowania własnego prawa sterowania sześciowirnikowcem, takim który okazał się najlepszym rozwiązaniem konstrukcyjnym dla wytyczonych celów. Ostatecznie, zdecydował się na dostępny handlowo sterownik, a przeprowadzone badania symulacyjne ułatwiły mu eksperymentalne strojenie znajdujących się w sterowniku algorytmów PID. Po prostu, obiekt sterowania jest nieliniowy i pracuje w tak zmiennych warunkach, że jest trudno zapewnić wystarczająco precyzyjny model matematyczny oraz odpowiednio szybkie przetwarzanie informacji pomiarowych w ekonomicznym procesorze na potrzeby bardziej zaawansowanych praw sterowania. Na przykład, wyznaczone na stacjonarnym stoisku siły i momenty sił (rys. 2.20) będą istotnie zmieniały się wraz z prędkością lotu czy temperaturą otoczenia. Cennym jest jednak, że Doktorant na tyle rozpoznał budowę i cechy sterownika Pixhawk, że będzie mógł włączyć własny moduł pomiaru zanieczyszczeń i poszukiwania jego źródła w układ planowania autonomicznego lotu.

Jak Doktorant słusznie zauważył w **rozdziale 3**, pracujące napędy (lotnicze śmigła) zaburzają naturalny ruch powietrza wokół śmigłowców. Te turbulencje mogą zakłócić poprawny odczyt systemu pomiaru zanieczyszczeń, a w szczególności pomiaru zawartości cząstek stałych. Aby znaleźć najlepszą lokalizację wlotu układu pomiarowego zawartości cząstek stałych PM, Doktorant przeprowadził obszerne obliczenia strumieni przepływowych generowanych przez napędy śmigłowca. Badania te prowadził dla różnej ilości napędów śmigłowca oraz różnych wielkości i kształtów śmigieł dostępnych na rynku. Do obliczeń wykorzystał program Fluent z pakietu ANSYS. W sposób poprawny stworzył siatkę geometryczną, dobrał elementy skończone i przeprowadził obliczenia, co potwierdziła konfrontacja z wynikami osiągniętymi eksperymentalnie

na zbudowanej przez siebie hamowni w przypadku pojedynczego napędu. Wyzначył również takie wielkości jak prędkości oraz ciśnienia zarówno strumieni wlotowych jak i wylotowych oraz generowane przez napędy siły i momenty nośne dla śmigłowców o układzie Kamowa, a także śmigłowców cztero- i sześciowirnikowych. Szkoda, że mając takie dane nie oszacował przy jakich prędkościach wiatru śmigłowiec mógłby jeszcze realizować zawis pomiarowy bez utraty stateczności. Natomiast badania te pozwoliły mu wybrać śmigłowiec sześciowirnikowy z wlotem pomiarowym czujnika PM położonym poniżej jego środka ciężkości. Wygląda na to, że takie rozwiązanie tak naprawdę Doktorant wybrał ze względów technicznych, a przeprowadzone obliczenia pozwoliły mu oszacować czy w tym miejscu zburzenia przepływu powietrza są na dopuszczalnym poziomie.

W **rozdziale 4** zostały zaprezentowane i przebadane symulacyjnie metody poszukiwania źródeł zanieczyszczenia z wykorzystaniem modelu pola zanieczyszczeń opisanego w poprzednim rozdziale. Przedstawiono wyniki dotyczące ośmiu algorytmów znanych z literatury na jednym zbiorczym rys. 4.15. Jako główne kryterium oceny tych metod Doktorant wybrał czas lotu niezbędny do znalezienia źródła zanieczyszczenia. Być może lepszym kryterium byłaby wartość zużytej do tego energii, ale pewnym przybliżeniem tego kryterium jest również czas lotu. Doktorant wyciągnął słuszny wniosek, że pewne algorytmy będą bardziej przydatne do zgrubnego poszukiwania źródeł zanieczyszczenia, natomiast inne – do ich precyzyjnej lokalizacji.

Ważną część pracy podczas realizacji celu rozprawy doktorskiej została wykonana w laboratorium. Autor w **rozdziale 5** przedstawił trzy rezultaty tej pracy. Zbudował laboratoryjną hamownię do pomiaru podstawowych charakterystyk napędów śmigłowca. W lotnictwie wykorzystuje się również hamownie latające, ale w przypadku niewielkich prędkości lotu wystarczą tylko badania stacjonarne. Wyniki pomiarów z hamowni pozwoliły Doktorantowi wybrać taką strukturę śmigłowca, która zapewni wysoką sprawność przekształcania energii elektrycznej w mechaniczną, a jednocześnie odpowiednio długi czas lotu. Najważniejszą część prac laboratoryjnych stanowi budowa i testowanie modułu sterująco-pomiarowego. Dodanie tego modułu do wyposażenia pokładowego pozwala przekształcić śmigłowiec w jednostkę zdolną do programowego zbierania danych o stężeniu cząstek stałych w powietrzu i ich przetwarzania w algorytmie poszukiwania źródła zanieczyszczenia. Tym samym zapewnia pewny poziom autonomii w realizacji postawionego zadania.

W **rozdziale 6** Doktorant opisał przeprowadzone testy polowe, podczas których było poszukiwane źródło zanieczyszczeń, jakim było palenisko grilla opalanego węglem drzewnym. Na niewielkim kwadratowym terenie, o powierzchni nie przekraczającej 1 hektara, poszukiwanie źródła trwało dosyć długo (około 10 minut) i nie zawsze kończyło się sukcesem. W ramach eksperymentów przetestowanych zostało kilka algorytmów poszukiwania źródła zanieczyszczeń. Testy potwierdziły, że zarówno skonstruowane wyposażenie pokładowe jak i przygotowane oprogramowanie pracują poprawnie. Misje pomiarowe były realizowane w założonym zakresie autonomii. Tym samym została przygotowana baza wyjściowa do dalszych prac nad wdrożeniem zaproponowanego rozwiązania do praktycznej eksploatacji.

Rozdział 7 zawiera podsumowanie wyników uzyskanych w rozprawie doktorskiej oraz wykaz zadań, które Doktorant chciałby zrealizować w przyszłości.

Prosiłbym w czasie publicznej obrony doktoratu o odpowiedź na następujące pytania.

1. Jak jest zbudowany i jak działa użyty w badaniach czujnik cząstek stałych PM?
2. Czy użycie innych dodatkowych czujników dałoby efekt synergii pomiarowej?
3. Dla jakich prędkości wiatru zaprojektowany robot latający utraciłby swoją stateczność?

Uwagi szczegółowe

Słabą stroną pracy jest interpunkcja i liczne niedociągnięcia edycyjne. Te błędy utrudniają zrozumienie treści, którą Autor chciałby przekazać czytelnikowi, a czasami wręcz uniemożliwiają

jej zrozumienie. Dobrym tego przykładem są zdania ze strony 121, w których słowo „to” występuje wielokrotnie.

Nie powinniśmy na siłę pompować język angielski do naszych określeń technicznych. Na przykład heksacopter/hexacopter/heksakopter ma polski równoważnik. Jest to śmigłowiec sześciowirnikowy.

Praca ma charakter interdyscyplinarny, a więc również jest skierowana do specjalistów z różnych działów techniki. Dlatego też używanie skrótów bez ich objaśnień jest niedopuszczalne. Niestety, ma to miejsce w wielu miejscach pracy, np. FPV (str.12), WFR-CFD (str.19), MEMS (str.32). Dobrze byłoby także objaśnić, co oznaczają indeksy liczbowe przy skrótach PM.

Przejęzyczenia: okładu (str.64), w dla (str.113), punktów (str.168).

Wzór (4.6) jest powtórzeniem wzoru (4.3).

Rys.4.14 – na jednym rysunku przedstawione zostały informacje nieporównywalne.

Str.117 – opis lokalizacji źródła zanieczyszczenia podany w tekście rozprawy nie jest zgodny z rys.4.1.

Str. 134 i 171 – nie ma załącznika 7.2.

Str. 213 – pozycja literatury 196 nie ma poprawnego opisu.

Niedociągnięć zauważyłem więcej, ale w większości powtarzane są błędy, które opisuję powyżej.

Ocena pracy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr inż. Grzegorza Suchanka jest obszerna zarówno tekstowo jak i merytorycznie. Jej celem było zbudowanie metody i stworzenie systemu, który by pomógł zlokalizować źródło zanieczyszczeń powietrza. Do tego celu został wykorzystany odpowiednio wyposażony śmigłowiec wielowirnikowy. Udało się Doktorantowi zbudować własny bardzo zaawansowany system pomiarowy, ale jeśli chodzi o metody, to korzystał ze znanych, niektóre jedynie modyfikował. Przedstawiona do recenzji praca należy do prac o charakterze diagnostycznym, gdyż postawiony cel pracy jest bardzo zbliżony do celów które stawiają sobie diagnostycy. Współczesne technologie są realizowane często przez bardzo złożone systemy techniczne, dla których budowane są systemy autodiagnostyki. W latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku mówiło się nawet o polskiej szkole diagnostyki. Szkoda więc, że Doktorant nie sięgnął do wypracowanych wówczas metod, które wykorzystywały również pojęcie entropii informacji, drzewa decyzyjne, itd. Mimo tej uwagi, przegląd literatury pozwolił Autorowi wyłowić pewne luki badawcze w interesującej go tematyce i niektóre rozwiązać w sposób przedstawiony w rozprawie.

Teraz chciałbym uwypuklić ważne zalety pracy, która ma charakter interdyscyplinarny, ale jej rdzeń mieści się w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Interdyscyplinarność polega na tym, że mamy w niej elementy inżynierii mechanicznej, inżynierii materiałowej, automatyki i informatyki stosowanej. Do głównych osiągnięć Autora należy zaliczyć następujące działania.

- Przeprowadzona została obszerna analiza najnowszych rozwiązań z tematyki rozprawy, a wyciągnięte z tej analizy wnioski wskazały pożądane cele badawcze. Jako kryterium oceny rozwiązania przyjął czas lotu inspekcyjnego śmigłowca.
- Zbudowane zostały modele matematyczne i symulacyjne śmigłowców o różnej konfiguracji napędów. Modele te posłużyły do oceny energetycznej i porównania sprawności napędów w rozważanych konfiguracjach. Dobrano prawa sterowania lotem śmigłowca o przyjętej konfiguracji. Przeanalizowano handlowo dostępne wyposażenie pokładowe pod kątem możliwości jego rozbudowy o własne moduły pomiarowo-sterujące.
- Metodą elementów skończonych wyznaczone zostały charakterystyki siłowe zespołów napędowych, a wartości sił i momentów sił zostały porównane z tymi wartościami otrzymanymi na hamowni. Aby uniknąć zaburzenia pola przepływu w pobliżu wlotu czujnika mierzącego zawartość cząstek stałych Doktorant przeprowadził szeroką analizę numeryczną wpływu ruchu śmigieł śmigłowca na otaczające go strugi powietrza. Określił

dopuszczalne lokalizacje wlotu czujnika.

- Zdefiniował model matematyczny pola zanieczyszczeń. Model ten wykorzystał do testowania symulacyjnego ośmiu znanych algorytmów używanych w zadaniach poszukiwania źródła zanieczyszczenia. Oceniając osiągi poszczególnych algorytmów podzielił je na te służące do szybkiego poszukiwania zgrubnego i te, które można wykorzystać w precyzyjnej lokalizacji źródła.
- Wykazał się dużymi umiejętnościami pracy laboratoryjnej Zbudował hamownię do pomiaru podstawowych charakterystyk napędów śmigłowca. Wyniki pomiarów z hamowni pozwoliły Doktorantowi wybrać taką strukturę śmigłowca, która zapewni wysoką sprawność przekształcania energii elektrycznej w mechaniczną, a jednocześnie odpowiednio długi czas lotu. Najważniejszą część prac laboratoryjnych stanowi budowa i testowanie modułu sterująco-pomiarowego, Dodanie tego modułu do wyposażenia pokładowego pozwala przekształcić śmigłowca w jednostkę zdolną do programowego zbierania danych o stężeniu cząstek stałych w powietrzu i ich przetwarzania w algorytmie poszukiwania źródła zanieczyszczenia. Tym samym zapewnia pewny poziom autonomii realizacji postawionego zadania.
- Przeprowadził obszerne badania poligonowe. Testował kilka algorytmów poszukiwania źródeł zanieczyszczenia cząstkami stałymi atmosfery na obszarze jednego hektara.

Przy rozwiązywaniu powyższych zadań Doktorant wykazał się dużą wiedzą, której istotne części poniżej uwypuklę.

- Doktorant wykazał się dużą wiedzą teoretyczną i praktyczną w zakresie robotyki mobilnej, systemów pomiarowych, algorytmów przekształcania sygnałów i ich oceny statystycznej oraz projektowania i realizacji podzespołów elektroniki cyfrowej. Posiadaną wiedzę i wypływające z niej przesłanki dla własnych rozwiązań przedstawił w rozprawie doktorskiej w sposób dość precyzyjny i przyjazny dla Czytelnika.
- Umiejętnie posługiwał się wieloma narzędziami służącymi do komputerowego wspomaganie projektowania, analizy i syntezy złożonych systemów technicznych. Do tych narzędzi należały Autodesk Inventor, ANSYS, Fluent, Matlab,
- W dużej mierze samodzielnie stworzył stosowne oprogramowanie wykorzystując języki programowania C, C++, skryptowy Matlab, Paython oraz częściowo - dostępne biblioteki programów.
- Zaprojektował i wykonał dwuwarstwowe obwody drukowane wraz z montażem niezbędnych elementów elektronicznych i mechanicznych.

Tym samym mgr inż. Grzegorz Suchanek potwierdził, że jest dojrzałym badaczem i naukowcem w zakresie dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska jest dobrym opracowaniem naukowym, a przede wszystkim ma duże znaczenie praktyczne. Biorąc pod uwagę zakres i poziom opracowania rozprawy doktorskiej, rzetelność przeprowadzonych badań i wnioskowań oraz ich praktyczne znaczenie dla inspekcji terytorialnej w celu detekcji i lokalizacji źródeł zanieczyszczenia otaczającej nas atmosfery stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji praca pt. "Budowa i algorytmy sterowania inspekcyjnego robota latającego" odpowiada warunkom stawianym rozprawom doktorskim w myśl stosownej Ustawy. Dlatego też wnoszę o dopuszczenie Autora, **mgra inż. Grzegorza Suchanka** do jej publicznej obrony w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Y. Gosiewski