



dr hab. inż. Paweł Drapikowski
Politechnika Poznańska
Instytut Automatyki i Inżynierii Informatycznej

Poznań, dnia 24.04.2017 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Stanisława Gardeckiego
pt. „Stabilizacja lotu wielowirnikowego robota latającego z napędem elektrycznym w warunkach zmiennego obciążenia i konfiguracji z wykorzystaniem pokładowych systemów mikroawioniki”

1. Cel zakres i charakter rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa składa się z ośmiu rozdziałów. W części początkowej zawarto streszczenia w języku polskim i angielski oraz zestawienie rysunków i tabel. Rozprawa napisana jest w języku polskim i liczy wraz z załącznikiem 119 stron.

Rozprawa dotyczy aktualnego problemu badawczego jakim jest sterowanie platform wielowirnikowych w warunkach zmiennych momentów i zmiennego położenia środka ciężkości będących skutkiem ruchów ramion manipulacyjnych.

Obecne zastosowania platform wielowirnikowych sprowadzają się głównie do fotografowania i filmowania, podczas którego ruchy kamery mają niewielki wpływ na dynamikę obiektu i nie wymagają uwzględnienia w algorytmach sterowania. Rozszerzenie możliwości układu sterowania, który jest w stanie zapewnić stabilny zawis w trakcie wykonywania operacji manipulacyjnych znacznie zwiększy zakres zastosowań robotów latających.

Realizacja tego zadania wiąże się z ograniczeniami wynikającymi z natury obiektu i ograniczonymi mocami obliczeniowymi komputera pokładowego oraz sposobem sterowania. Ograniczenia nakładają również wywodzące się z modelarstwa RC komponenty takie jak silniki BLDC, regulatory ESC oraz nadajniki i odbiorniki RC.

Aby realizacja zadania manipulacyjnego była możliwa najpierw platforma latająca (platforma bazowa) musi charakteryzować się stabilnym zawisem oraz możliwością wykonywania zadanych manewrów a przede wszystkim odpornością na zakłócenia w postaci podmuchów wiatru. Charakterystyka zachowania się platform wielowirnikowych w powietrzu jest taka, że każda zmiana orientacji w zakresie kątów *roll* i *pitch* powoduje zmianę położenia. Stąd stabilizacja platformy w zakresie tych kątów jest podstawowym zadaniem pokładowego układu regulacji.

Jakość regulacji zależy w dużej mierze od jakości sensorów i zakłóceń sygnałów sensorycznych. Podstawowymi sensorami platform latających są: trójosiowy żyroskop i akcelerometr wspomagane magnetometrem i barometrem. Zakłócenia sygnałów sensorycznych wynikające z drgań konstrukcji nośnej przenoszącej drgania jednostek napędowych spowodowane najczęściej nieprecyzyjnym wyważeniem śmigieł oraz zmian geometrii ramy są powodem nieprawidłowej pracy układu regulacji i niestabilnego zachowania się drona w powietrzu.

Stąd istotna część badań Doktoranta poświęcona została konstrukcji ramy nośnej, która musi charakteryzować się niewielką masą własną przy zachowaniu sztywności i wytrzymałości oraz jej drgania własne muszą znacząco różnić się od drgań generowanych przez jednostki napędowe.

Ważnym kierunkiem badań Doktoranta było dokładne zbadanie różnych sensorów (akcelerometrów, żyroskopów, magnetometrów i barometrów) i w konsekwencji opracowanie własnego modułu pomiarowego AHRS, w którym najważniejszą rolę odgrywa jednostka IMU

ADIS16488. Zastosowanie różnych sensorów wymusiło opracowanie algorytmu fuzji sygnałów sensorycznych i zaimplementowanie w mikrokontrolerze modułu pomiarowego AHRS. Doktorant zbadał filtr komplementarny, filtr Kalmana oraz nieliniowy filtr komplementarny Mahony'ego. Ostatecznie wybrał filtr Mahony'ego ze względu na najlepsze właściwości zarówno w fazie zawisu jak i podczas wykonywania manewrów.

Konstrukcja ramy nośnej oraz jednostki pomiarowej AHRS ewaluowała poprzez kolejne wersje platform latających.

Na platformie bazowej z jednostką pomiarowo-przetwarzającą i komputerem pokładowym zainstalowano dwa ramiona manipulacyjne o trzech stopniach swobody. Wyznaczono modele dynamiki manipulatorów. Podczas ich ruchu zmienia się środek ciężkości platformy i powstają oddziaływania dynamiczne, które stanowią zakłócenia dla układu regulacji zaimplementowanego w klasycznej konfiguracji z regulatorami PID. Regulatory PID z nastawami dobranymi dla ramion manipulacyjnych w pozycji spoczynkowej nie radzą sobie w wystarczający sposób z zapewnieniem stabilnej pozycji w locie, gdy ramiona poruszają się. Dyplomant zaproponował rozszerzenie klasycznego układu sterowania platformy wielowirnikowej składającego się z regulatora PID i miksera o dodatkowy moduł wspomagający modyfikujący pracę miksera. W tym celu konieczne było wyznaczenie modelu prostego i odwrotnego zespołu napędowego. Model prosty przetwarza wejściowy sygnał PWM na siłę ciągu zespołu napędowego co pozwala na wprowadzenie korekty ciągu wynikającej z oddziaływań dynamicznych. Model odwrotny przetwarza siłę ciągu do postaci sygnału PWM, który podawany jest następnie na wejście modelarskich regulatorów ESC.

Zakres przedstawionych w rozprawie zagadnień jest szeroki i obejmuje: sensorykę, przetwarzanie sygnałów, mechanikę konstrukcji, klasyczną automatykę, modelowanie i symulację, optymalizację, analizę statystyczną wyników pomiarów oraz badania eksperymentalne. Na szczególną uwagę zasługuje bardzo szeroki zakres prac eksperymentalnych, który obejmuje wszystkie poruszane w rozprawie zagadnienia. Biorąc pod uwagę, że obiektem badań jest statek powietrzny należy podkreślić, że ze wszystkimi badaniami w locie wiązało się niebezpieczeństwo uszkodzenia quadcoptera szczególnie w początkowej fazie badań. Dla zminimalizowania ewentualnych strat Doktorant zbudował dwa stanowiska badawcze. Pierwsze (równoważnię), na którym dron unieruchamiany jest w jednej z osi zapewniając możliwość przeprowadzenia badań w bezpiecznych laboratoryjnych warunkach. Stanowisko to zapewniło możliwość wstępnego doboru nastaw regulatorów PID. Drugie (hamownię) umożliwiające badanie jednostek napędowych.

Autor sformułował tezę główną, że możliwa jest automatyczna stabilizacja zawisu i lotu wielowirnikowego robota latającego w warunkach zmiennego rozkładu mas i obciążenia systemu manipulacyjnego umożliwiającą przeprowadzenie czynności manipulacyjnych.

Teza główna została uzupełniona trzema tezami pomocniczymi, które głoszą że:

- Optymalizacja konstrukcji mechanicznej platformy ma istotne znaczenie z punktu widzenia redukcji szumów wywołanych przez wibracje mechaniczne co ma wpływ na działanie układu sterowania i wyniki pomiarów parametrów lotu.
- Możliwa jest selektywna kompensacja oddziaływań zwrotnych o znanych momentach obrotowych działających na platformę.
- Kluczowe znaczenie dla efektywności procedur przetwarzania sygnałów pomiarowych i algorytmów sterowania ma ich weryfikacja w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

Treści poszczególnych rozdziałów w sposób systematyczny prezentują wykonane przez Doktoranta prace badawcze poczynając od przeglądu rozwiązań konstrukcyjnych spotykanych w platformach wielowirnikowych i własne osiągnięcia w tym zakresie, poprzez sensory stosowane do pomiarów parametrów lotu i fuzję danych pomiarowych, do systemów awioniki pokładowej. Wymienione powyżej elementy wraz z jednostkami napędowymi i konsolą operatora stanowią niezbędne minimum, aby wielowirnikowy statek powietrzny zdolny był do lotu.

Elementem wyróżniającym konstrukcję zaproponowaną przez Doktoranta na tle rozwiązań komercyjnych powszechnie obecnie dostępnych jest obecność ramion manipulacyjnych na pokładzie wielowirnikowego statku powietrznego. Konstrukcje takie jedynie w ograniczonym zakresie pojawiają się jako wyniki prac zespołów badawczych.

2. Wyniki rozprawy z uwzględnieniem oryginalnych osiągnięć Autora oraz uwagi ogólne

Główne wyniki rozprawy w mojej ocenie to:

- Opracowanie i wykonanie modułowej, skalowalnej platformy wielowirnikowej w zakresie konstrukcji mechanicznej i awioniki pokładowej w sensie sprzętowym i programowym.
- Szczegółowe zbadanie sensorów mierzących parametry lotu, metod filtracji i fuzji danych pomiarowych oraz opracowanie i wykonanie osobnego modułu pomiarowo przetwarzającego.
- Dobór konfiguracji regulatorów w zależności od kierunku stabilizacji oraz metodologia doboru nastaw regulatorów przy zmianach konstrukcyjnych platformy latającej.
- Zaimplementowanie głównej pętli sterowania pracującej w przerwaniowym reżimie czasowym.
- Zaprojektowanie i wykonanie ramion manipulacyjnych oraz ich integracja ze strukturą platformy wielowirnikowej.

Oryginalnymi wynikami Autora są:

- Opracowanie konstrukcji ramy nośnej platformy latającej zapewniającej odpowiednią sztywność, redukcję drgań (rys. 2.10) i odporność na odkształcenia skrętne z zachowaniem skalowalności i modułowości, rozwiązania chronione patentem.
- Opracowanie i wykonanie modułowej architektury awioniki pokładowej zarówno w sensie funkcjonalnym jak i w zakresie geometrycznego rozmieszczenia komponentów zapewniające zwartość konstrukcji.
- Zaimplementowanie mechanizmu umożliwiającego płynną zmianę trybów pracy komputera pokładowego.
- Opracowanie algorytmu kompensacji oddziaływań zwrotnych charakteryzującego się możliwością selektywnej kompensacji wybranych oddziaływań o znanych momentach obrotowych
- Modyfikacja pracy miksera w algorytmie stabilizacji lotu podczas oddziaływań dynamicznych bez konieczności zmiany rodzaju i nastaw regulatorów.
- Weryfikacja rozwiązań sprzętowych i programowych podczas badań eksperymentalnych w locie.

Uwagi ogólne

Teza główna rozprawy została jasno określona i udowodniona. Natomiast w pierwszej tezie pomocniczej należałoby odwrócić końcowe sformułowanie do postaci: ...na wyniki pomiarów parametrów lotu i działanie układu sterowania. Najpierw mierzymy i przetwarzamy sygnały pomiarowe a potem sterujemy. Trzecia teza pomocnicza wydaje się oczywista. Jednak biorąc pod uwagę, że mamy do czynienia z obiektem latającym, którego lot może podlegać różnym

zakłóceniom zewnętrznym i wewnętrznym prowadzącym do kolizji z elementami otoczenia lub z ziemią, akcentowanie konieczności weryfikacji eksperymentalnej opracowanych algorytmów w warunkach rzeczywistych jest uzasadnione.

3. Uwagi szczegółowe

1. W rozdziale dotyczącym badania jednostki napędowej pojawiło się sformułowanie, że zastosowanie dwusilnikowego zespołu napędowego „znaczaco poprawia bezpieczeństwo lotów” (str. 22). Czy wykonano eksperyment w locie (nad siatką zabezpieczającą) polegający na wyłączeniu jednego z napędów.
2. Jaki jest wpływ jednostki dwunapędowej na wysokość oddziaływania typu *ground effect*. Przy jakiej wysokości zawisu ten efekt występuje dla jednostek jedno i dwu napędowych w kontekście długości ramion manipulacyjnych.
3. Przy charakterystykach porównawczych jednostek napędowych (rys. 2.5, str. 22) nie podano skoku śmigła. Rys. 2.5b jednostka pojedyncza ma większy ciąg niż podwójna przy takim samym sygnale PWM, chyba odwrotnie.
4. Brakuje charakterystyki porównawczej śmigieł dwu i trójłopatowych. Jakie są kryteria doboru śmigła.
5. Czy w pracach nad konstrukcją mechaniczną zbadano wpływ wiatru na drgania konstrukcji i zakłócenia układu pomiarowego.
6. W rozdziale dotyczącym fuzji sygnałów sensorycznych na str. 41 pojawia się zdanie: „Ponieważ uzyskane rezultaty były niezadawalające, podjęto prace nad algorytmami fuzji danych z dodatkowych czujników”. Z jakich dodatkowych czujników skorzystano?
7. W rozdziale dotyczącym sposobu strojenia regulatora na str. 54 znalazło się stwierdzenie, że quadcopter jest obiektem całkującym II rzędu. Brakuje jednak określenia wejścia i wyjścia.
8. W tym samym rozdziale zawarto sformułowanie, że wstępne strojenie regulatora wykonano na podstawie modeli symulacyjnych. Brakuje jednak doprecyzowania czy model jest modelem ogólnym (literaturowym) i na ile jego parametry odpowiadają rzeczywistemu obiektowi.
9. Wśród cytowanych pozycji zabrakło zbiorowego opracowania pt. Algorytmy sterowania quadratora, wykonanego w 2013 r. na Politechnice Wrocławskiej.
10. W rozdziale dotyczącym kompensacji oddziaływań zwrotnych na str. 80, rys. 6.2 przedstawiono błąd kąta *Roll*. Nie skomentowano jednak, dlaczego błędy na stanowisku są gorsze niż w locie swobodnym.
11. Na tym samym rys. i dalszych pokazujących błędy kątów względem wartości zadanej przedstawiono wariancję i odch. standardowe, które wiąże oczywista zależność.
12. W części rozdziału 6 dotyczącej wyznaczania modeli siły ciągu śmigła brakuje informacji o wielkości i skoku śmigła.
13. Str. 88 dlaczego badania przeprowadzono przy napięciu 12.8V, gdy zalecane napięcie dla akumulatorów LiPol nie powinno być niższe niż 3.65V na celę.

4. Wnioski końcowe

Przedstawiona do oceny rozprawa charakteryzuje się logicznym układem treści. Aktualny stan badań przedstawiono w rozdziale 2 oraz w miejscach logicznie powiązanych z dalszymi rozważaniami. Zaprezentowany przegląd literatury oraz wnioski końcowe przedstawione w kontekście aktualnego stanu wiedzy świadczą o wszechstronnej wiedzy Doktoranta w rozważanej dyscyplinie naukowej.

Analizując rozwiązania sprzętowe i programowe kolejnych wersji platform latających można zauważyć dogłębną analizę przyczyn napotkanych problemów i dążenie do ich

rozwiązania w kolejnej wersji. Recenzowana rozprawa świadczy o dużym doświadczeniu praktycznym Doktoranta.

Rozprawa zredagowana jest bardzo starannie, zawiera nieliczne błędy redakcyjne (np. str. 9) co nie umniejsza jej wartości. Układ pracy jest poprawny, a każdy rozdział zakończony jest podsumowaniem. Brakuje natomiast zestawienia skrótów.

W rozprawie w sposób wyczerpujący w świetle aktualnego stanu wiedzy zaprezentowano możliwości wykorzystania ramion manipulacyjnych zainstalowanych na pokładzie platformy wielowirnikowej oraz uwzględnienia ich dynamiki w układzie sterowania bez znaczącej ingerencji w jego strukturę. Prace te potwierdzone eksperymentalnie stawiają dokonania Doktoranta w czołówce nielicznych zresztą tego typu prac na świecie. Potwierdzeniem kompetencji Doktoranta w zakresie realizacji prac projektowo konstrukcyjnych dotyczących wielowirnikowych platform latających (zakończonych eksperymentami w rzeczywistych warunkach) jest kierowanie projektami realizowanym na zlecenie firmy Airbus Defense and Space i WZL2.

Recenzowana rozprawa jednoznacznie pokazuje bardzo dobre przygotowanie Doktoranta do realizacji prac projektowo konstrukcyjnych w zakresie mechaniki, sensoryki i mikroprocesorowych układów elektronicznych oraz ich programowania. Na podkreślenie zasługuje duża wiedza i doświadczenie w zakresie modelarstwa lotniczego RC.

O dojrzałości naukowej Doktoranta świadczy trafne sformułowanie kierunków dalszych badań.

Doktorant posługuje się swobodnie aparatem pojęciowym związanym z mechaniką, robotyką, sterowaniem, automatyką oraz sensoryką.

Bibliografia rozprawy zawiera 52 prawidłowo dobrane pozycje, z których większość (45) opublikowana została w ostatnich 7 latach. Liczną grupę stanowią cytowania z ostatnich 3 lat, co wskazuje, że podjęta problematyka badawcza jest aktualna. 15 pozycji wymienionych w bibliografii stanowią autocytowania, wśród których w 6 przypadkach Doktorant jest pierwszym autorem. Prezentowane w rozprawie wyniki Doktorant uzyskał w dłuższym okresie czasu i były one na bieżąco publikowane. Nie umniejsza to oryginalności pracy a jedynie wskazuje, na bieżącą aktywność naukową.

W świetle obowiązującej Ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, ze zm. Dz. U. z 2005r. nr 164, poz. 1365 oraz Dz. U. z 2011r. nr 84, poz. 455) **wnioskuję o dopuszczenie mgr. inż. Stanisława Gardeckiego do publicznej obrony.**