



dr hab. inż. Zbigniew Madohny, prof. PP

Szczecin, 9.05.2017 r.

Prof. dr hab. inż. Stefan Domek
Katedra Automatyki Przemysłowej i Robotyki
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY WYDZIAŁU ELEKTRYCZNEGO POLITECHNIKI POZNAŃSKIEJ

Tytuł rozprawy: **Stabilizacja lotu wielowirnikowego robota latającego z napędem elektrycznym w warunkach zmiennego obciążenia i konfiguracji z wykorzystaniem pokładowych systemów mikroawioniki**

Autor rozprawy: **mgr. inż. Stanisław Gardecki**

1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA, ZAKRES I CEL ROZPRAWY

Problematyka sterowania wielowirnikowymi platformami latającymi wyposażonymi w manipulatory od co najmniej kilku lat wzbudza duże zainteresowanie teoretyków i praktyków automatyki. Z jednej strony przystosowanie robotów latających do przenoszenia oraz manipulacji ładunkami zwiększa znacząco obszar ich zastosowań, np. o misje transportowe, naprawcze i ratunkowe, z drugiej jednak wymaga rozbudowy układu sterowania o system kompensacji oddziaływań zwrotnych wynikających ze zmiennego obciążenia i konfiguracji robota.

Autor rozprawy postanowił włączyć się w nurt badań na ten temat prowadzonych aktualnie przez zaledwie kilka ośrodków światowych i wszechstronnie zbadać wpływ zmiennego rozkładu mas i obciążenia systemu manipulacyjnego robota latającego na jego lot a następnie zaproponować sposób skutecznej kompensacji związanych z tym zakłóceń.

Swoje zadanie ujął w postaci dwóch powiązanych celów naukowo-badawczych, mających udowodnić sformułowane w pracy tezy:

- po pierwsze przeprowadził szereg iteracyjnych prac konstrukcyjnych i w efekcie zbudował wielowirnikową platformę latającą z manipulatorami, pokładowym systemem mikroawioniki o konstrukcji modułowej i zespołem sensorów, która służyła jako obiekt badawczy do późniejszej optymalizacji konstrukcji robota oraz jej systemów sensorycznych i sterujących;

- po drugie zaproponował autorskie sposoby kompensacji oddziaływań zwrotnych manipulatorów na lot platformy wielowirnikowej a następnie sprawdził ich efektywność na drodze symulacji, badań laboratoryjnych na stanowisku pomiarowym i badań w locie.

Uważam, że podjęcie tematu rozprawy doktorskiej z tego zakresu było celowe i potrzebne, zarówno ze względów poznawczych, teoretycznych jak i praktycznych a postawione cele i jasno sformułowane tezy określiły istotne i aktualne na tle obecnego stanu wiedzy, a zarazem oryginalne, zadanie badawcze.

2. ZAWARTOŚĆ MERYTORYCZNA ROZPRAWY

Recenzowana rozprawa liczy 118 strony, zawiera 55 rysunków oraz 12 tabel. Podzielona jest na osiem rozdziałów, poprzedzonych streszczeniami w języku polskim i angielskim, spisami rysunków i tabel oraz uzupełnionych spisem literatury i krótkim dodatkiem.

Praca podzielona została na dwie części. W pierwszej, obejmującej rozdziały od drugiego do czwartego, opisano ewolucję konstrukcji wykorzystywanej latającej platformy badawczej:

- w rozdziale pierwszym Autor podał aktualny stan wiedzy na temat wielowirnikowych platform latających z manipulatorami i ich systemów sterowania i na tym tle omówił założenia, cel, zakres i tezy pracy (główną i trzy poboczne).
- w rozdziale drugim opisał konstrukcję robota, jego strukturę kinematyczną i wszystkie podzespoły. Warto dodać, że platformę eksperymentalną V5 Falcon w lekko zmodyfikowanej postaci Dropter wykorzystano przy realizacji zadań związanych z projektem StarTiger Europejskiej Agencji Kosmicznej, w którym Autor brał udział;
- w rozdziale trzecim Autor opisał stanowiska pomiarowe i modele symulacyjne wykorzystane przy pracach nad algorytmem sterowania, czujniki pokładowe wykorzystywane do estymacji orientacji platformy latającej, algorytmy fuzji sygnałów pomiarowych, regulatory orientacji i wzniosu robota, algorytm dystrybucji obrotów w systemie wielowirnikowym oraz możliwe tryby sterowania robotem;
- w rozdziale czwartym Autor omówił zadania systemów awioniki wielowirnikowych platform latających a następnie opisał przyjętą hierarchiczną strukturę systemu awioniki i poszczególne moduły jej warstwy niższej i nadrzędnej oraz układy diagnostyczno-zabezpieczające.

W drugiej, zasadniczej części pracy Autor opisał dodany do bazowej platformy latającej dwuramienny system manipulacyjny oraz przedstawił i zweryfikował algorytmy kompensacji wywołanych jego pracą oddziaływań zwrotnych:

- w rozdziale piątym omówił konstrukcję systemu manipulacyjnego oraz przedstawił jego model analityczny a następnie opisał wprowadzone modyfikacje konstrukcji związane z dodanym dwuramiennym systemem manipulacyjnym oraz rozszerzenie warstwy niższej awioniki pokładowej o moduły sterowników systemu manipulacyjnego i niezbędne moduły komunikacyjne;
- w rozdziale szóstym opisał szereg eksperymentów służących analizie wpływu ruchu manipulatorów na zachowanie platformy oraz zaproponował autorski sposób wprowadzenia do układu stabilizacji platformy korekty kompensującej oddziaływania zwrotne manipulatora. Głównym założeniem Autora było zachowanie istniejącej struktury układu sterowania

i włączenie korekty na poziomie miksera rozdzielającego sygnały wyjściowe z regulatorów pomiędzy poszczególne jednostki napędowe;

– w rozdziale siódmym Autor przedstawił obszerne wyniki badań układu kompensacji oddziaływań zwrotnych. Testy ograniczone do jednego stopnia swobody przeprowadzono na stanowisku pomiarowym a testy pełne w lotach na hali.

W rozdziale ósmym podsumował zawartość pracy i uzyskane wyniki. Sformułował również liczne wnioski natury ogólnej i szczegółowej oraz wskazał na możliwe dalsze kierunki badań.

W zakończeniu rozprawy podał spis literatury obejmujący 52 pozycje, w większości trafnie dobrane i poprawnie cytowane w tekście rozprawy. Siedemnaście pozycji, w tym jeden patent, stanowią ściśle związane z tematyką rozprawy prace autorstwa lub współautorstwa Doktoranta, w większości zagraniczne, co świadczy o Jego dużej aktywności badawczej i umiejętności prezentowania własnych dokonań naukowych. Potwierdzeniem tej aktywności jest również udział we wspomnianym wcześniej projekcie StarTiger realizowanym dla Europejskiej Agencji Kosmicznej oraz kierowanie projektem Innolot dotyczącym opracowania specjalistycznej rodziny platform wielowirnikowych dla Wojskowych Zakładów Lotniczych nr 2 w Bydgoszczy.

3. OGÓLNA OCENA ROZPRAWY

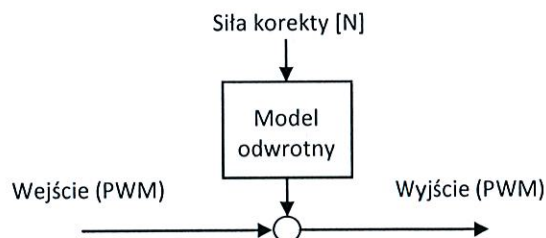
Autor rozprawy zrealizował postawione cele w sposób kompleksowy, używając właściwej metodyki badań, przejrzystie przywołując źródła inspiracji i założenia proponowanych metod. Przeprowadzona analiza źródeł literaturowych przedmiotu, obszerność rozważań, duża liczba eksperymentów i krytyczna ocena uzyskanych wyników zasługują na pochwałę i stanowią moim zdaniem duże osiągnięcie Autora.

Do najważniejszych dokonań Doktoranta zaliczam:

1. przeprowadzenie szeregu badań czujników pokładowych (akcelerometrów, żyroskopów, magnetometrów, barometrów);
2. opracowanie, wykonanie oraz przebadanie różnych modułów układu AHRS (ang. Attitude and Heading Reference System) informującego o położeniu i kursie robota, pod kątem minimalizacji wpływu zmian konstrukcji mechanicznej na jakość stabilizacji;
3. przebadanie różnych algorytmów filtracji i fuzji danych pod kątem jakości estymacji orientacji i wysokości nad ziemią platformy latającej;
4. opracowanie modułowej i skalowalnej konstrukcji mechanicznej latających robotów wielowirnikowych wyposażonych w specjalizowane dwuramienne systemy manipulacyjne;
5. zaproponowanie algorytmu selektywnej kompensacji wybranych oddziaływań zwrotnych o znanych momentach obrotowych;
6. przeprowadzenie dużej liczby badań latającego robota z manipulatorami na stanowiskach pomiarowych i w warunkach rzeczywistych.

Podczas lektury rozprawy nasunęło mi się kilka uwag, o charakterze częściowo dyskusyjnym, ale wartych komentarza Doktoranta:

1. na str. 109 Autor przyjmując za nadrzędny cel prostotę obliczeniową algorytmu i zachowanie struktury algorytmu sterowania, zastosował znaną w automatyce metodę kompensacji stałego obciążenia sygnałem stałym przeciwnie skierowanym. W pracy dotyczy to zakłóceń statycznych od zmiany środka ciężkości manipulatora. Czy Autor, będąc świadomym ograniczeń proponowanej metody kompensacji (patrz uwaga na str. 110 i wykresy na str. 109) i możliwości innych rozwiązań sterowania pracą platform latających (patrz uwaga na str. 51), rozważał zastosowanie którejs z stosunkowo prostych metod kompensacji dynamicznej, np. typu sterowanie feed-forward przez model?
2. czy Autor poza materiałem zebrany w ramach doktoratu podejmował próby sprawdzenia wybranej wersji algorytmu z aktywną eliminacją zakłóceń lub adaptacyjnego, rozwiązując problem oddziaływań zwrotnych manipulatora robota latającego?
4. struktura zmodyfikowanego algorytmu kompensacji przedstawiona na rys. 6.4 b) jest niewątpliwie lepsza od struktury z rys. 6.4 a) w przypadku niezgodności modeli prostego i odwrotnego jednostek napędowych, chociaż bardziej złożona numerycznie. Szkoda, że Autor nie zauważył, iż korzystając ze zwykłego przekształcania schematów blokowych z rysunku 6.4 a) uzyskać można strukturę równoważną strukturze zmodyfikowanej 6.4 b), ale zdecydowanie prostszą w realizacji bo wykorzystującą tylko model odwrotny:



Uniknąć w ten sposób można błędów złożenia modeli pokazanych na rys. 6.7, 6.8 i zamieszczonych w Tab. 6.5 i 6.6;

5. jak wytłumaczyć niezerową wartość współczynnika a_0 we wzorze (6.1) skoro dla napięcia $voltage = 0$ (brak obrotu śmigieł) ciąg powinien być równy zero? dlaczego przy współczynniku a_2 jest znak minus?
6. wzór (6.2) nie przedstawia modelu odwrotnego, dla którego powinno być:

$$pwm1 = a_6 * (voltage)^2 + a_5 * (voltage) + a_4 * (thrust)^2 + a_3 * (thrust) + a_2 * (ratio)^2 + a_1 * (ratio) + a_0$$
7. na rys. 2.5 b) najprawdopodobniej zamieniono oznaczenia charakterystyk; co oznacza jednostka ciągu [gf]?
8. we wzorze (3.1) powinno być $\alpha_k = \alpha_{k-1} + \omega_k \Delta t_k$ skoro Autor dopuszcza zmienność odstępu czasowego Δt (możliwość zmiany ω jest oczywista); ten sam błąd popełniono we wzorach (3.6), (3.7) oraz (3.9);

9. wzory (3.8) do (3.11) nie opisują filtru Kalmana, jak napisano w pracy, tylko są macierzowym zapisem modelu (3.7), poprawnym dla stałego odstępu czasu pomiędzy próbkami;
10. w pracy brak jakiejkolwiek informacji o sposobie realizacji i strojenia filtru Kalmana; wzmianka o macierzach kowariancji Q i R na str. 43 nie jest wystarczająca;
11. podobnie, jak w przypadku filtru Kalmana, w pracy brak jakiejkolwiek informacji o sposobie realizacji i strojenia filtru Mahony'ego; niczego nie wyjaśnia również zdanie o specjalnej ortogonalnej grupie obrotów $SO(3)$? na str. 44;
12. na str. 52 Autor pisze o modelu matematycznym platformy latającej nie podając jakichkolwiek szczegółów a jedynie odwołanie do swojej wcześniejszej pracy; podobnie na str. 53 nie podaje żadnych informacji ani źródeł o wymienionym modelu zmodyfikowanym;
13. na str. 88 napisano, że „różnica między $pwm1$ i $pwm2$ może wynosić maksymalnie 40%, gdyż tak rozłożone były punkty pomiarowe wykorzystane do trenowania modeli”; skąd wynikało to ograniczenie, skoro na rys. 6.5 pokazano rozkłady punktów pomiarowych, dla których różnice wynoszą np. $\pm 50\%$ (dla $pwm1=40\%$), $+67\%$ (dla $pwm1=30\%$) a nawet $+100\%$ (dla $pwm1=10\%$ i 20%)?
14. stwierdzenie „Koncepcja ta pozwala na zaprojektowanie zwartego systemu awioniki i jest autorskim pomysłem, nie występującym w innych konstrukcjach, zarówno profesjonalnych, badawczych jak i amatorskich” na str. 25 jest moim zdaniem zbyt odważne, zwłaszcza w sytuacji powszechnego stosowania elastycznych obwodów drukowanych o rozkładzie przestrzennym, jak np. w laptopach, smartfonach i aparatach fotograficznych;

4. UWAGI SZCZEGÓŁOWE

Praca napisana jest poprawnym i zrozumiałym językiem oraz starannie zredagowana, chociaż trochę rażą dość liczne błędy literowe (edytorskie) oraz niektóre nieprecyzyjne sformułowania, np.:

1. na str. 93: „autoadaptacyjny” i „dokładność modeli można polepszyć przez zaproponowanie rozbudowanych modeli”;
2. na str. 14: „W drugiej części opisano *dodanie* do bazowej platformy latającej *dwuramienny system manipulacyjny* oraz przedstawiono i zweryfikowano algorytmy kompensacji oddziaływań zwrotnych. W rozdziale 5 zaprezentowano *konstrukcje* wspomnianego systemu manipulacyjnego oraz jego opis analityczny. Opisano wprowadzone modyfikacje konstrukcji związane z dodanym dwuramiennym systemem manipulacyjnym oraz *modyfikacji* algorytmów sterujących ze względu na wymogi zadania manipulacyjnego. Propozycje struktur sterowania pozwalających na integrację algorytmów kompensujących *wpływu* oddziaływań zwrotnych na platformę latającą, ...”;
3. rys. 3.3 jest moim zdaniem zbyt mały i przez to nieczytelny;
4. zapis $b = [\cos(\psi)0 - \sin(\psi)]^T$ na str. 47 jest niejasny;

5. we wzorze (3.19) wprowadzono nowe, inne oznaczenie na odstęp czasu między próbkami niż we wzorze (3.17) – odpowiednio T i Δt ?
6. na rys. 3.7 źle oznaczono kąty *Roll* i *Pitch*;
7. nawiasy przy argumentach funkcji trygonometrycznych we wzorach (5.3) – (5.7) i (5.11) są niepotrzebne;
8. wyniki pokazane na rys. 6.6 byłyby bardziej czytelne gdyby Autor zastosował jednakowe skale osi Y dla wszystkich przebiegów;
9. niektóre pozycje literatury nie są uporządkowane alfabetycznie (np. 11, 12, 23-25);

Zauważone błędy nie obniżają mojej pozytywnej oceny rozprawy.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

W moim odczuciu rozprawa ma silnie eksperymentalny charakter i pokazuje przede wszystkim duże umiejętności konstrukcyjne i praktyczne Doktoranta, ale jednocześnie potwierdza Jego duże zdolności badawcze i umiejętność rozwiązywania problemów z zakresu teorii sterowania złożonymi obiektami, jakimi są platformy wielowirnikowe, w obecności silnych zakłóceń.

Dokonania Autora przedstawione w rozprawie uważam za oryginalne powiązanie zdobyczy teorii sterowania, mikroelektroniki i mechaniki w robotyce a zadanie naukowe określone w tytule i celach rozprawy za jasno sformułowane a następnie poprawnie rozwiązane przy użyciu właściwych metod matematycznych, konstrukcyjnych i programowych oraz potwierdzone na drodze licznych badań symulacyjnych, laboratoryjnych i przeprowadzonych w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków pracy robota. Doktorant w sposób kompleksowy zebrał rozproszone w literaturze światowej informacje, porównał wady i zalety nielicznych znanych rozwiązań, zaproponował własną modyfikację algorytmu sterowania, zwiększającą obszar stabilnej pracy robota latającego w warunkach zmiennego obciążenia i konfiguracji, przy zachowaniu umiarkowanego stopnia złożoności obliczeniowej algorytmu. Tym samym wykazał, że posiada niezbędną wiedzę w zakresie dyscypliny naukowej *automatyka i robotyka* oraz że ma duże predyspozycje do prowadzenia badań naukowych, wcześniej potwierdzone publikacjami autorskimi wymienionymi w wykazie literatury oraz udziałem w realizacji ważnych projektów.

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji praca doktorska mgr. inż. Stanisława Gardeckiego pt. *Stabilizacja lotu wielowirnikowego robota latającego z napędem elektrycznym w warunkach zmiennego obciążenia i konfiguracji z wykorzystaniem pokładowych systemów mikroawioniki* spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) stawiane rozprawom doktorskim, jak również kryteria zwyczajowo przyjęte w tym zakresie w krajowym środowisku naukowym w dyscyplinie *automatyka i robotyka*, i wnioskuję o jej przyjęcie oraz dopuszczenie do publicznej obrony.