

Prof. dr hab. inż. Zdzisław Gosiewski
ul. Polna 11C, Opacz Kolonia
05-816 Michałowice
tel. kom. 606-483601

Opacz Kolonia, 15. 01. 2015

R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Piotra Grzybowskiego** nt.

Heurystyczne prawa sterowania wspomagające pilotaż mikrosamolotów

Promotor: prof. dr hab. inż. Jan Gruszecki, Politechnika Rzeszowska

Lokalizacja tematyki rozprawy w technice

W ostatnich latach nastąpił gwałtowny rozwój mobilnych obiektów bezzałogowych, w tym obiektów latających. Aktualnie, najmniejsze obiekty samolotopodobne (ze skrzydłami zamocowanymi na stałe do kadłuba) mają wymiary rzędu kilkunastu centymetrów. Mniejsze samoloty nie mogą być zrealizowane z wielu przyczyn, z których najważniejsza - to zbyt duża masa źródeł energii elektrycznej. Ale również, wraz ze zmniejszaniem obiektu latającego, gwałtownie rosną inne problemy wynikające z: aerodynamiki (dla opływów charakteryzowanych przez małe liczby Reynoldsa), dynamiki obiektu (małe stałe czasowe, człony opóźniające) czy układów sterowania (masa elementów automatyki). Tym samym, projektowanie i realizacja małych obiektów latających jest aktualnie ważnym i trudnym zadaniem zarówno konstrukcyjnym jak i badawczym. Właśnie metodyka projektowania, realizacji i badań maksymalnie małego obiektu samolotopodobnego (mieszczącego się w sześcianie o wymiarach 20 cm i masie około 100 g) jest przedmiotem rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Grzybowskiego.

Krytyczne omówienie pracy

Rozprawa liczy 132 strony, składa się z 7 rozdziałów, bibliografii, spisu ważniejszych oznaczeń oraz załączników zarówno w wersji papierowej jak i w postaci

elektronicznej (CD). Pierwszy rozdział jest wprowadzeniem do techniki małych obiektów latających. W tym rozdziale, na bazie dostępnej literatury, Autor analizuje problemy związane z realizacją tych obiektów. Związany z tym rozdziałem przegląd literatury krajowej, a przede wszystkim zagranicznej, jest dalece niepełny, co częściowo usprawiedliwione jest faktem, że znaczące jej pozycje pojawiły się w ciągu ostatnich kilku lat. Na przykład kanadyjski *Journal of Unmanned Vehicle Systems* jest wydawany dopiero drugi rok. W pierwszym rozdziale prezentowane są również cele i teza rozprawy. Zarówno w tezie jak i w tytule pracy został użyty zbyt duży skrót myślowy – chodzi raczej o układ sterowania z regulatorem rozmytym a nie tylko o prawa sterowania. Dobrze byłoby również podkreślić różnicę w sterowaniu mikrosamolotem dla przypadku, gdy pilot-operator jest regulatorem i nawigatorem oraz, gdy pilot jedynie zadaje ruchy, czyli nawiguje, a sterowanie realizuje autopilot.

W rozdziale drugim przedstawione zostały badania na symulatorze pilotów-operatorów, gdy pilot obok zadań nawigacji realizuje zadania sterowania bezzałogowych samolotów. Ze względu na brak lub małe doświadczenie wybranej ze studentów grupy operatorów oceniano ich działania na większym obiekcie – motoszybowcu. Na potrzeby badań opracowano testowy tor lotu zawierający wszystkie fazy występujące w praktycznym pilotażu. Wyniki badań wykazały potrzebę uzupełnienia obiektu latającego przynajmniej o układ stabilizacji, a system także o stację naziemną dostarczającą operatorowi informacji o parametrach nawigacyjnych.

Po przeanalizowaniu funkcjonalności metod sztucznej inteligencji dla realizacji postawionego zadania Doktorant wybrał logikę rozmytą na potrzeby projektowania praw sterowania. Struktura regulatora została ograniczona do dwóch kanałów sterowania: pochylaniem i przechylaniem mikrosamolotu. Dokonana została wstępna selekcja reguł sterowania, przy czym ograniczono się do regulacji o działaniu proporcjonalnym. W stosunku do klasycznych autopilotów zabrakło pętli wewnętrznych sterujących prędkościami kątowymi. Być może okazały się zbędne w przypadku mikrosamolotów. Tym samym zakres działania zaproponowanego autopilota został mocno ograniczony.

W kolejnym rozdziale prezentowane są wyniki badań symulacyjnych zarówno w trybie Software-In-The-Loop jak i w trybie Hardware-In-The-Loop. Do tych badań wykorzystano szereg narzędzi programowych: Matlab/Simulink, X-Plane jak i sprzętowych: Naziemna Stacja Kontroli Lotu, urządzenia transmisji danych no i

oczywiście - własne produkty. Tu strojenie parametrów regulatora w kanale pochylenia powiązано z korekcją wynikającą ze zmiany prędkości lotu. Na potrzeby badań wykorzystano niejawną model obiektu uzyskany procedurami X-Plane. Na koniec przetestowano na grupie pilotów –operatorów działanie sterowanego przez nich obiektu jak i jego nawigowanie po uzupełnieniu mikrosamolotu układem sterowania orientacją.

W rozdziale piątym opisano cały zaprojektowany system: obiekt, strukturę układu sterowania, strukturę układu nawigacji, systemy pokładowe, strukturę i zadania stacji naziemnej, wzajemne połączenia sprzętowe i teletransmisyjne. Do budowy systemu wykorzystano zarówno elementy nabyte handlowo, jak i własne zaprojektowane oraz wykonane komponenty. Kryteria wyboru podzespołów wynikały z wyżej wspomnianych założeń projektowych (masowych oraz geometrycznych) jak i możliwości ich integracji. Tu w pełni zgadzam się z zdaniem Autora, że ze względu na szybki rozwój procesorów oraz technologii nano i MEMS „*można przyjąć, że już w chwili wyboru podzespołów przez konstruktora rozwiązanie jest przestarzałe*” (str.76).

Rozdział szósty poświęcony jest prezentacji wyników badań w locie. Przebadano dwa modele, gdyż zasilanie pierwszego z nich nie spełniało wszystkich wymagań wynikających z zapotrzebowania na moc układu napędowego. Badania poligonowe przeprowadzono na wcześniej ustalonej trasie. Analiza wyników z lotu pozwoliła skorygować prawa sterowania przez dobranie wag reguł logicznych. W krótkim podsumowaniu (rozdział 7) przedstawiono najważniejsze wyniki i osiągnięcia rozprawy a także niedociągnięcia badawcze. Wskazano również na kierunki dalszych prac, aby poprawić uzyskane rezultaty konstrukcyjno-badawcze.

Uwagi szczegółowe

W pracy zauważyłem szereg niedociągnięć i błędów edytorskich, które poniżej wyszczególnię.

Rys.2.1 – aparatura to nadajnik RC plus odbiornik?

Str.18 – co to jest sterownica?

Str. 27 góra – wśród działań brakuje analizy dynamiki obiektu.

Str. 27 – gdzie są punkty 3-5?

Str. 27 – synteza (projektowanie) praw sterowania jest chyba ich strojeniem.

Str.29 – co Autor rozumie przez trudności certyfikacyjne?

Str. 30 – jeśli A we wzorze (3.1) jest napisane kursywą to i w tekście należy stosować kursywę.

Str. 30, wykresy 4.1, 4.3 i dalej - prędkości kątowe oznaczono małymi i dużymi literami.

Rys.3.2 – sugeruje zastosowanie pełnego regulatora PID, gdy tymczasem dalej projektowany jest regulator P.

Początek punktu 3.3.1 – znane są metody sterowania adaptacyjnego, na przykład regulator z planowanym wzmocnieniem.

Str. 49 – ustawienie przepustnicy, wcześniej sterownicy, nadajnika RC. Wprowadzanie różnych określeń tego samego urządzenia jest mylące.

Str. 50 i dalej - wprowadzenie określenia *wykresy* obok *rysunków* jest mylące, co z resztą, jeśli chodzi o odniesienia, zaowocowało błędami w tekście.

Tab. 4.1 – o jaką cięciwę chodzi?

W p. 4.2 - nie napisano jasno czy wyniki badań dotyczą samego obiektu czy obiektu z układem sterowania.

Str.65 – gdzie są rys. 4.10 (może wykres 4.9), i rys.4.17?

Str.70 – Autor powołuje się na rysunki – chyba chodzi o wykresy?

Str.73 – gdzie są rys.4.22 i 4.23?

Tab.4.4 – Pilot 5 – ocena 0?

Tytuł p.5.1.1 – Analiza funkcjonalna to dział matematyki.

Str. 79 – o jaką prędkość i wysokość lotu chodzi?

Str.81 – dla baterii litowo-polimerowych stosuje się skróty Li-Po lub Li-Poly.

Dla rys.5.5 i 5.7 nie ma odniesień w tekście.

Str.89 i dalej – nie wszystkie oznaczenia we wzorach zostały dokładnie objaśnione.

Np. S - jest w spisie oznaczeń, ale ogólnie jako powierzchnia – czego?

Ocena pracy

Doktorant skonstruował mikrosamolot i przebadał możliwości pilotażowe jego obsługi przez pilota-operatora. Warto podkreślić, że istotna część obiektu (płatowiec, stacja naziemna, autopilot orientacji przestrzennej) została zrealizowana przy współpracy Autora rozprawy. Jest to chyba w tej chwili najmniejszy z obiektów samolotopodobnych zrealizowanych w Polsce, którego obsługa lotu jest dostępna dla mało doświadczonego operatora. Ta obsługa została ułatwiona przez przedstawiony w rozprawie układ sterowania w kanałach pochylania i przechylania,

przy czym nie tylko zostały zaprojektowane prawa sterowania, ale cały układ sterowania został przez Doktoranta zrealizowany z wykorzystaniem własnych i dostępnych handlowo elementów automatyki.

Wart podkreślenia jest fakt, że urządzenie zostało przez Doktoranta przebadane w warunkach laboratoryjnych i poligonowych. Postawione zadania projektowe i badawcze rozwiązywał w sposób konsekwentny, jak to przedstawiłem w omówieniu zawartości rozprawy. O poprawności rozwiązania zadania badawczego świadczy wiele faktów zawartych w pracy doktorskiej. Chciałbym tu je uwypuklić oraz przedstawić podstawowe zalety rozprawy ze względu na wybór opracowanego materiału oraz badawczy wkład Autora. Są to:

- Obszerna analiza najnowszych rozwiązań oraz duża wiedza praktyczna w zakresie techniki lotniczej, szczególnie dotyczącej wyposażenia pokładowego dla bezzałogowych aparatów latających .
- Opracowanie koncepcji, wykonanie i przebadanie mikrosamolotu.
- Wyznaczanie niejawnego modelu symulacyjnego w programie X-Plane i przerzucenie go do Matlaba.
- Zaprojektowanie praw sterowania w technice logiki rozmytej.
- Przygotowanie oprogramowania i badania symulacyjne algorytmów sterujących orientacją przestrzenną mikrosamolotu. Uzupełnienie praw sterowania o ich korekcję w funkcji prędkości lotu.
- Zaprojektowanie i wykonanie i oprogramowanie pełnego prototypu układu sterowania (autopilota).
- Przeprowadzenie obszernych badań laboratoryjnych a następnie poligonowych celem oceny możliwości pilotowania mikrosamolotu. Przebadanie przez grupę mało doświadczonych studentów jako operatorów zbudowanego systemu pod kątem oceny w skali Coopera-Harpera możliwości pilotowania mikrosamolotu z zaproponowanym wspomaganie.

Rozwiązania powyższych problemów oraz zastosowane do rozwiązania narzędzia i metody świadczą o dobrym przygotowaniu Doktoranta do prowadzenia badań naukowych i o odpowiedniej wiedzy w zakresie obejmującym tematykę rozprawy doktorskiej. Praca została napisana w sposób klarowny, na dobrym poziomie edycyjnym. Zawarte w dodatkach elektronicznych programy zarówno sterujące jak i służące do automatyzacji badań świadczą o dużej pracowitości pracy.

W pracy zauważyłem kilka niedociągnięć, które wcześniej przedstawiałem. Ponadto zastosowane rozwiązania problemu są stosunkowo proste. Ale chyba nie mogą być inne przy przyjętych ograniczeniach masowych i objętościowych. Zaproponowany układ sterowania oparty został na regulatorach rozmytych. Wymagają one pracochłonnego strojenia z wykorzystaniem rzeczywistego obiektu. Jednocześnie przy większej liczbie wejść i wyjść liczba reguł przynależności gwałtownie rośnie. Stąd rodzą się pytania. Czy to było również przyczyną zastosowania tylko regulacji proporcjonalnej a pominięcia działań całkujących lub różniczkujących? Czy nie należało przeprowadzić badań tunelowych obiektu, aby otrzymać jawny model matematyczny w celu wsparcia prowadzonych rozważań? Proszę o odpowiedź na zadane powyżej pytania.

Poczynione przeze mnie krytyczne uwagi nie umniejszają wagi uzyskanych wyników. Powinny być natomiast uwzględnione w dalszych badaniach i publikacjach wyników badań. Jeszcze raz podkreślam, że praca świadczy o dużej wiedzy Doktoranta i przygotowaniu do samodzielnych badań.

Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska jest wartościowym opracowaniem naukowym, a jednocześnie ma bardzo duże znaczenie praktyczne. Biorąc pod uwagę zakres i poziom opracowania rozprawy doktorskiej, rzetelność przeprowadzonych badań i wnioskowań oraz ich praktyczne znaczenie dla rozpowszechnienia techniki mikrolotniczej stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji praca pt. „*Heurystyczne prawa sterowania wspomagające pilotaż mikrosamolotów*” odpowiada warunkom stawianym rozprawom doktorskim w myśl stosownej Ustawy. Dlatego też wnoszę o dopuszczenie jej Autora, mgr inż. **Piotra Grzybowskiego** do publicznej obrony.

A. Gosikowski