



Zielona Góra, 25.08.2016r.

Prof. dr hab. inż. Marcin Witczak
Instytut Sterowania i Systemów Informatycznych
Wydział Informatyki, Elektrotechniki i Automatyki
Uniwersytet Zielonogórski
Ul. Podgórna 50
65- 246 Zielona Góra
M.Witczak@issi.uz.zgora.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej

Mgra inż. Jarosława Goślińskiego
pod tytułem

**„Application of selected methods of Kalman Filtration to estimation of state
and model parameters of the unmanned flying robot”**

opracowana na zlecenie
Wydziału Elektrycznego
Politechniki Poznańskiej

I. Problem naukowy i obszar rozprawy

Problemem naukowym stanowiącym przedmiot recenzowanej rozprawy doktorskiej jest opracowanie i zastosowanie metod estymacji stanu i parametrów dla bezzałogowego robota latającego.

Bieżący rozwój technologiczny rodzi potrzebę konstruowania bezzałogowych robotów latających, które używane są do realizacji wielu ambitnych zadań. Posiadają one szerokie spektrum zastosowań, poczynając od czysto rozrywkowych, a kończąc na poważnych zadaniach, takich jak monitorowanie rurociągów, lasów oraz aplikacjach wojskowych. Pomimo swojej niekwestionowanej przydatności, rodzą one wiele problemów technicznych związanych z procesem sterowania i pomiarem wielkości opisujących przebieg lotu robota. Oczywiście jest, że zaawansowane układy sterowania wymagają odpowiednio dokładnego modelu matematycznego robota, którego opracowanie składa się z faz budowy modelu analitycznego i estymacji jego parametrów na podstawie zbioru empirycznych danych

pomiarowych. Ze względu na wagę robota, bezzałogowe układy latające są zazwyczaj zaopatrzone w ograniczoną liczbę czujników pomiarowych. Rodzi to konieczność stosowania estymatorów stanu, które umożliwiają odtworzenie wartości niemierzalnych wielkości. Począwszy od lat 60tych ubiegłego stulecia, filtr Kalmana stał się szeroko stosowanym narzędziem umożliwiającym rozwiązanie zadania estymacji stanu i parametrów systemów dynamicznych. Na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci, rozwiązania bazujące na filtrze Kalmana stale ewoluowały. W literaturze przedmiotu można zaobserwować jego aplikacje dla różnych klas systemów. Niewątpliwie na dużą uwagę zasługuje bezśladowy filtr Kalmana, który został opracowany na początku lat 90tych ubiegłego stulecia. Rozwiązanie to przeznaczone jest dla systemów nieliniowych i jednocześnie pozbawione jest poważnej wady jaką jest konieczność linearyzacji systemu. Powoduje ona zazwyczaj wiele problemów ze zbieżnością estymatora. Od początku lat 90tych, bezśladowy filtr Kalmana jest stale udoskonalany, co owocuje nowymi rozwiązaniami publikowanymi w liczących się czasopismach naukowych i monografiach. W literaturze pokazuje się również znaczącą liczbę przykładów jego praktycznego zastosowania, uzasadniających przejrzyste korzyści płynące z implementacji bezśladowego filtra Kalmana.

Przedstawiona rozprawa skupia się na opracowaniu technik estymacji parametrów i stanu z zastosowaniem bezśladowego filtra Kalmana oraz ich praktyczną implementację dla czterowirnikowego robota latającego (ang. *Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle, QUAV*).

Celem przedstawionych badań było udowodnienie następującej tezy:

- Zastosowanie adaptacyjnego bezśladowego pierwiastkowego filtra Kalmana (ang. Adaptive Square-Root Unscented Kalman Filter, ASRUKF) zwiększa odporność systemu pomiarowego w przypadku wystąpienia zakłóceń oraz uszkodzeń lub awarii czujników pomiarowych.

Doktorant uszczegóławia powyższą tezę poprzez podzielenie jej na następujące składowe:

1. zastosowanie estymacji parametrów modelu redukuje błędy modelowania;
2. zastosowanie metod optymalizacji przy ustawianiu parametrów obserwatora zwiększa jakość jego funkcjonowania;
3. dekompozycja obserwatorów efektywnie redukuje ich czas przetwarzania;
4. modele w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego są lepiej dostosowane do zadań estymacji stanu i parametrów;
5. Zastosowanie dualnego ASRUKF wraz algorytmami sztucznej inteligencji prowadzi do rozwiązań bliskich optymalnych.

Natomiast, do najważniejszych zadań badawczych należy zaliczyć:

- Opracowanie modeli QUAV;
- Opracowanie metod estymacji modeli QUAV z zastosowaniem ASRUKF;
- Optymalizacja jakości funkcjonowania schematów identyfikacji QUAV;
- Opracowanie schematów estymacji stanu QUAV z zastosowaniem otrzymanych modeli parametrycznych;

- Opracowanie heurystycznych metod optymalizacji dla schematów estymacji parametrów i stanu QUAV.

Podsumowując, należy podkreślić, że rezultatem praktycznym pracy jest aplikacja pozwalająca na weryfikację opracowanych algorytmów.

II. Koncepcja i struktura rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska zawiera 5 rozdziałów, dodatek oraz bibliografię. Podstawę pracy stanowią rozdziały od 2'ego do 4'tego, które prezentują oryginalne wyniki naukowe Doktoranta w zakresie projektowania schematów estymacji stanu i parametrów. Nowatorskie wyniki pracy naukowej doktoranta dotyczą również zastosowania opracowanych metod i technik dla układu QUAV.

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do tematyki rozprawy, prezentuje podstawowe cele i zakres pracy. Obejmuje także podstawowe definicje, zastosowania oraz motywacje podjęcia tematu przez Autora. Rozdział przedstawia również przegląd stanu wiedzy w zakresie rozważanych algorytmów. Doktorant w bardzo interesujący i staranny sposób przedstawia szerokie spektrum metod związanych ze sterowaniem oraz estymacją stanu i parametrów QUAV, analizując ich wady i zalety. Wynikiem przeprowadzonej analizy jest teza pracy. Rozdział kończy się krótkim przeglądem literatury związanym z przedmiotem pracy.

Rozdział 2 dotyczy opracowania modeli QUAV z zastosowaniem różnych rozwiązań. Ponadto, Autor przedstawia podstawowy schemat sterowania QUAV, jak również metody odpowiedniego sterowania wznoszenia się QUAV. Doktorant wskazuje i rozwiązuje szereg problemów związanych z modelowaniem QUAV. W kolejnym punkcie rozdziału, Autor koncentruje się na projektowaniu regulatorów PID dla potrzeb sterowania wznoszenia i pozycji QUAV.

W **Rozdziale 3** doktorant prezentuje autorskie rozwiązania w zakresie estymacji parametrów QUAV z zastosowaniem ASRUKF. Oprócz rozważań natury czysto teoretycznej, na szczególną uwagę zasługuje szereg eksperymentów przeprowadzonych przez autora, które obrazują dokładnie efektywności opracowanych rozwiązań. Doktorant prezentuje również rozwiązanie umożliwiające optymalizację parametrów estymatora z zastosowaniem algorytmu roju cząstek (ang. Particle Swarm Optimization, PSO). Rozdział zawiera również szereg porównań z rozwiązaniami istniejącymi w literaturze.

Rozdział 4 bazuje na rozwiązaniach przedstawionych w rozdziałach 2 i 3, wprowadzając jednocześnie istotne opracowania w zakresie metod estymacji stanu. W szczególności, autor przedstawia metody estymacji stanu związane z obserwatorem Luenbergera, filtrem Kalman, rozszerzonym filtrem Kalmana, bezśladowym filtrem Kalmana, ASRUKF. Rozdział przedstawia powiązanie rozwiązań teoretycznych i praktycznych dotyczących estymacji stanu QUAV. Autor przedstawia również oryginalne rozwiązanie, które nazywa komplementarnym filtrem Kalmana (ang. Complementary Kalman Filre, CKF). Głównym osiągnięciem prezentowanym w rozdziale są metody estymacji dedykowane dla QUAV. W szczególności, autor wykorzystuje opracowane

wcześniej metody sterowania i estymacji parametrów wraz z zaproponowanymi modelami QUAV. W celu integracji i polepszenia jakości funkcjonowania zaproponowanych rozwiązań, autor proponuje zastosowanie algorytmu roju cząstek.

Rozdział 5 zawiera podsumowanie oraz ewentualne kierunki dalszych prac. **Wykaz bibliograficzny** obejmuje 120 pozycji, które bardzo dobrze odzwierciedlają istniejący stan wiedzy.

III. Oryginalne osiągnięcia i znaczenie poznawcze

Przedmiotem pracy badawczej było zaproponowanie nowatorskich metod sterowania oraz estymacji stanu i parametrów dla QUAV. Zgodnie z zaprezentowanym w pracy, obecnym stanem wiedzy, w rozważanym obszarze badawczym nie rozpatrywano dotychczas tak sformułowanych rozwiązań. Autor zauważył i przeanalizował szereg interesujących aspektów problemu, które były pomijane lub stanowiły marginalny element w innych opracowaniach. Stąd też konieczne okazało się rozwiązanie wielu cząstkowych zadań. Do najważniejszych osiągnięć rozprawy można zaliczyć:

- Opracowanie modeli QUAV;
- Opracowanie metod estymacji modeli QUAV z zastosowaniem ASRUKF;
- Optymalizacja jakości funkcjonowania schematów identyfikacji QUAV;
- Opracowanie schematów estymacji stanu QUAV z zastosowaniem otrzymanych modeli parametrycznych;
- Opracowanie heurystycznych metod optymalizacji dla schematów estymacji parametrów i stanu QUAV.

Zaproponowane metody umożliwiają rozwiązanie problemów sterowania oraz estymacji stanu i parametrów, dla których istniejące w literaturze rozwiązania nie dają zadowalających rezultatów. Świadczy to jednoznacznie o osiągnięciu przez Autora celu postawionego we wstępnej części pracy, zdefiniowanego w postaci tezy pracy.

Dorobek naukowy autora rozprawy (przedstawiony w pracy doktorskiej) obejmuje 8 publikacji, w tym 2 artykuły w czasopismach JCR:

- IEEE Sensors Journal (30pkt., lista A);
- Advances in Electrical and Computer Engineering (15pkt, lista A);

oraz artykuł w Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems. Doktorant był również współautorem 3 publikacji w materiałach międzynarodowych konferencji naukowych takich jak:

- Int. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO);
- Int. Conf. on Intelligent Environments;
- Asian Control Conference;

oraz dwóch rozdziałów w książkach:

- Recent Advances in Automation, Robotics and Measuring Techniques;
- Progress in Automation, Robotics and Measuring Techniques;

Uwzględniając wymienione osiągnięcia naukowo-badawcze oraz fakt ich opublikowania w wyżej wymienionych pozycjach, uważam że mgr inż. Jarosław Gośliński zrealizował cel

rozprawy, udowodnił postawioną tezę oraz wykazał się wiedzą i umiejętnością samodzielnego rozwiązywania trudnych problemów teoretycznych i praktycznych szeroko rozumianej współczesnej automatyki i robotyki w zakresie metod sterowania oraz estymacji parametrów i stanu dla nieliniowych systemów dynamicznych.

IV. Uwagi i komentarze dotyczące rozprawy

Uwagi ogólne:

1. Na stronie 77 Autor zdawkowo stwierdza, że SRUKF charakteryzuje się lepszą stabilnością niż UKF (ang. the method is based on Square Root Unscented Kalman Filter, which has better stability compared to Unscented Kalman Filter (UKF).) Co Autor rozumie pod pojęciem stabilności i w jaki sposób dowodzi tak postawioną tezę?
2. System opisany równaniami (3.1)-(3.2), posiada liniowe równanie stanu, co wydaje się jednoznacznie określać strukturę estymatora (3.3)-(3.22). Oznacza to, że część algorytmu związana z równaniem (3.1) mogłaby być zrealizowana w analogiczny sposób jak w konwencjonalnym filtrze Kalmana, a fragment związany z (3.2) tak jak w algorytmie UKF. Prezentowane rozwiązanie wydaje się nie uwzględniać tej właściwości, tzn. przy pewnych modyfikacjach, równanie (3.1) mogłoby być nieliniowe.
3. Autor stosuje zaproponowaną metodę estymacji parametrów dla konkretnego systemu, tzn. dla QUAV. Wydaje się, że uwzględnienie ograniczeń związanych z wartościami parametrów systemu (które mają konkretne fizyczne znaczenie) przyczyniłoby się do znacznego zwiększenia jakości estymacji. Tak postawione zadanie można zrealizować z zastosowaniem rozwiązań zaproponowanych w pracy Teixeira, Bruno OS, et al. "On unscented kalman filtering with state interval constraints." *Journal of Process Control* 20.1 (2010): 45-57.
4. Co było motywacją do zastosowania algorytmu roju cząstek (PSO) do strojenia ustawień SRUKF? Czy nie lepsze byłoby zastosowanie dedykowanych rozwiązań, np.: Dunik, Jindřich, Miroslav Simandl, and Ondřej Straka. "Unscented Kalman filter: aspects and adaptive setting of scaling parameter." *IEEE Transactions on Automatic Control* 57.9 (2012): 2411-2416.
5. W pracy brak jest rozważań dotyczących zasady separowalności proponowanego układu sterowania i estymacji. Jest to szczególnie interesujące w świetle nieliniowości całego układu.
6. Podobnie jak w przypadku algorytmów estymacji parametrów, w rozwiązaniach zaprezentowanych w rozdziale 4, autor pomija znane ograniczenia zmiennych stanu QUAV. Ich wprowadzenie spowodowałoby dalszą poprawę funkcjonowania estymatora stanu.

Uwagi szczegółowe:

- Praca zawiera kilkanaście błędów edytorskich, np. Str. 23: "Fig. ??".
- Brak definicji "cholupdate". Po raz pierwszy pojawia się na stronie 57 bez odpowiednich objaśnień (por. 4.135).
- Równanie (4.82) jest prawdziwe jedynie dla skalarnej funkcji $f(.)$ i wektora stanu o wymiarze 1.
- Lista skrótów ułatwiłaby lekturę pracy.

V. Podsumowanie recenzji

Reasumując, podniesione wyżej uwagi krytyczne i komentarze nie wpływają na wysoką ocenę oryginalnych i opublikowanych osiągnięć naukowo-badawczych, zasadniczych wyników zawartych w recenzowanej rozprawie oraz jej ogólną pozytywną ocenę, która wyraźnie wykracza ponad poziom przeciętny.

Przedstawione wyniki stanowią niewątpliwie rozwiązanie istotnego problemu naukowego, a także dobrze świadczą o posiadanej przez Doktoranta wiedzy i umiejętnościach praktycznych w zakresie metod sterowania oraz estymacji parametrów i stanu dla nieliniowych systemów dynamicznych. Stwierdzam zatem, że przedstawiona przez magistra inżyniera Jarosława Goślińskiego rozprawa spełnia warunki określone w art. 13 ust. 1 i ust. 2 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku i wnioskuję o dopuszczenie go do publicznej obrony.

Mosir Rtel