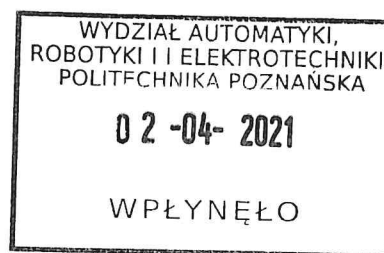


Zielona Góra, 31.03.2021r.

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



PRZEWODNICZĄCY RADY DYSCYPLINY
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika

Szeląg
prof. dr hab. inż. Wojciech Szeląg

Recenzja rozprawy doktorskiej

Mgra inż. Krzysztofa Łakomy
pod tytułem

„Kaskadowe układy sterowania odpornego ze sprzężeniem od wyjścia dla robotów mobilnych w zadaniach ruchu przestrzennego: podejście VFO-ADR”

opracowana na zlecenie
Politechniki Poznańskiej

I. Problem naukowy i obszar rozprawy

Problemem naukowym stanowiącym przedmiot recenzowanej rozprawy doktorskiej jest opracowanie i analiza metod sterowania odpornego ze sprzężeniem od wyjścia dla robotów mobilnych w zadaniach ruchu przestrzennego. Bieżący rozwój technologiczny rodzi potrzebę konstruowania coraz bardziej wyrafinowanych technik sterowania. Niniejsze uwarunkowania przekształciły teorię sterowania ze sztuki projektowania zadowalająco działającego układu regulacji do nowoczesnej gałęzi nauki jaką jest dzisiaj. Na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat zostało opracowanych wiele różnego rodzaju strategii i technik zwiększających jakość i niezawodność sterowania. Na szczególną uwagę zasługują: sterowanie optymalne, sterowanie predykcyjne, sterowanie adaptacyjne, sterowanie odporne, oraz sterowanie ślizgowe. Na znaczącą uwagę zasługuje również sterowanie tolerujące uszkodzenia stanowiące pomost pomiędzy zaawansowanymi układami diagnostyki uszkodzeń i systemami sterowania. W ostatnich latach pojawiają się również rozwiązania hybrydowe łączące powyższe techniki. Podejścia hybrydowe dają możliwość łączenia zalet

powyższych strategii przy jednoczesnej eliminacji ich wad. Zagadnienie projektowania strategii sterowania odpornego jest bardzo ważnym i stale aktualnym problemem teorii sterowania. Od przełomu lat 60tych i 70tych ubiegłego stulecia, techniki sterowania odpornego są stale rozwijane oraz doskonalone. W literaturze pokazuje się również znaczącą liczbę przykładów ich praktycznego zastosowania pokazujących przejrzyste korzyści płynące z jego zastosowania.

Przedstawiona do recenzji rozprawa skupia się na opracowaniu narzędzi sterowania i obserwacji systemów oraz ich zastosowaniu dla robotów mobilnych w zadaniach ruchu przestrzennego.

Celem przedstawionych badań było udowodnienie następującej tezy:

Stosowne połączenie metod VFO (ang. Vector-Field-Orientation) i ADR (ang. Active-Disturbance-Rejection) w kaskadowym układzie sterowania zaprojektowanym dla wybranej klasy platform mobilnych pozwala na odporną realizację precyzyjnych manewrów w przestrzeni trójwymiarowej, pomimo znacznych niepewności modelu obiektu i informacji zwrotnej ograniczonej do konfiguracji pojazdu.

Natomiast, do najważniejszych zadań badawczych należy zaliczyć:

- zaprojektowanie równań sterownika w oparciu o równania kinematyki i dynamiki modelu obiektu oraz zgodnie z przyjętymi ograniczeniami i założonymi cechami sterownika;
- analizę stabilności układu zamkniętego z wykorzystaniem prezentowanego rozwiązania, której wynik powinien przedstawiać ilościowo wyrażoną gwarancję jakości działania zaprojektowanej struktury oraz potwierdzać odporność na niepewności modelu;
- symulacyjną weryfikację metody sterowania, która powinna potwierdzać wyniki teoretyczne uzyskane w procesie analizy stabilności;
- eksperymentalną walidację zaproponowanych rozwiązań na stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w autonomiczny sterowiec.

Powyższe zadania zostały zrealizowane dla czterech wariantów struktury sterowania:

- śledzenie trajektorii bez kompensacji dryfu poprzecznego;
- śledzenie trajektorii z kompensacją dryfu poprzecznego;
- odtwarzanie ścieżki bez kompensacji dryfu poprzecznego;
- odtwarzanie ścieżki z kompensacją dryfu poprzecznego.

Podsumowując, należy podkreślić, że rezultatem praktycznym pracy jest również aplikacja pozwalająca na weryfikację efektywności opracowanych technik sterowania i obserwacji.

II. Koncepcja i struktura rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska zawiera 8 rozdziałów oraz bibliografię. Podstawę pracy stanowią rozdziały od 2ego do 6ego, które prezentują oryginalne wyniki naukowe Doktoranta w zakresie projektowania i kompleksowej analizy kaskadowego systemu sterowania umożliwiającego precyzyjną realizację wybranych zadań ruchu przez robota poruszającego się w przestrzeni trójwymiarowej.

Kolejne rozdziały pracy zorganizowane są w następujący sposób:

- **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 obszerny przegląd stanu wiedzy w zakresie sterowania odpornego. Doktorant w bardzo interesujący i staranny sposób przedstawia szerokie spektrum metod sterowania odpornego, analizując ich wady i zalety.
- Wynikiem przeprowadzonej analizy są problemy badawcze, które autor definiuje w **rozdziale 2**. Celem drugiego rozdziału jest dokładne przedstawienie charakteru rozważanego obiektu sterowania. Doktorant opisuje rodzaje własności wybranej klasy obiektów sterowania. W rozdziale znajduje się opis sygnałów referencyjnych w poszczególnych zadaniach ruchu. Zostały również przedstawione założenia konieczne do poprawnego działania struktury opisanej w kolejnym rozdziale. Podsumowując, doktorant zdefiniował warunki niezbędne do realizacji zadań sterowania.
- W **rozdziale 3** doktorant przedstawia rozwiązanie zadania sterownika, które zostało postawione w rozdziale 2. W szczególności, realizuje to z zastosowaniem dwustopniowej, kaskadowej struktury układu sterowania. Pętla zewnętrzna tej struktury bazuje na rozwiązaniu VFO, a wewnętrzna na ADR.
- **Rozdział 4** zawiera dokładny analizę jakości sterowania proponowanych rozwiązań. Doktorant przeanalizował poszczególne podsystemy zgodnie z metodyką badania stabilności typu wejście-stan. W rozdziale tym (pkt. 4.1.8) przedstawia się również główny wynik pracy dotyczący twierdzenia gwarantowanego (lokalnie) śledzenia trajektorii oraz odtwarzania ścieżki nieparametrycznej.
- **Rozdział 5** zawiera badania symulacyjne, które potwierdzają wyniki formalne przedstawione w rozdziale 4. Doktorant podaje parę scenariuszy dla każdego z obu zadań ruchu oraz analizuje otrzymane wyniki z wykorzystaniem struktury sterowania VFO-ADR dla obiektu w pełni dosterowanego. Doktorant przeanalizował sterowanie ruchu obiektu oraz przedstawił zrealizowany zakres ruchu.
- **Rozdział 6** zawiera rezultaty badań przeprowadzonych na stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w sterowiec dotyczące dwóch scenariuszy: śledzenia trajektorii i odtwarzania ścieżki.

- **Rozdział 7** jest podsumowaniem wcześniejszych rozdziałów i kompletnym opisem kaskadowego układu sterowania oraz wyników, które doktorant otrzymał w wyniku analizy dowodowej i eksperymentalnej.
- **Rozdział 8** jest dodatkiem do reszty rozdziałów i obejmuje informacje o szacowanych wartościach kluczowych parametrów układów sterowania.
- **Wykaz bibliograficzny** obejmuje 94 pozycje, które bardzo dobrze odzwierciedlają istniejący stan wiedzy.

III. Oryginalne osiągnięcia i znaczenie poznawcze

Przedmiotem pracy badawczej było zaprojektowanie i kompleksowa analiza kaskadowego systemu sterowania umożliwiającego precyzyjną realizację wybranych zadań ruchu przez robota poruszającego się w przestrzeni trójwymiarowej. Zgodnie z zaprezentowanym w pracy, obecnym stanem wiedzy, w rozważanym obszarze badawczym nie rozpatrywano dotychczas tak sformułowanych metod sterowania. 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:

- zaprojektowanie równań sterownika w oparciu o równania kinematyki i dynamiki modelu obiektu oraz zgodnie z przyjętymi ograniczeniami i założonymi cechami sterownika;
- analizę stabilności układu zamkniętego z wykorzystaniem prezentowanego rozwiązania, której wynik powinien przedstawiać ilościowo wyrażoną gwarancję jakości działania zaprojektowanej struktury oraz potwierdzać odporność na niepewności modelu;
- symulacyjną weryfikację metody sterowania, która powinna potwierdzać wyniki teoretyczne uzyskane w procesie analizy stabilności;
- eksperymentalną walidację zaproponowanych rozwiązań na stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w autonomiczny sterowiec.

Powyższe zadania zostały zrealizowane dla czterech wariantów struktury sterowania:

- śledzenie trajektorii bez kompensacji dryfu poprzecznego;
- śledzenie trajektorii z kompensacją dryfu poprzecznego;
- odtwarzanie ścieżki bez kompensacji dryfu poprzecznego;
- odtwarzanie ścieżki z kompensacją dryfu poprzecznego.

Zaproponowane metody umożliwiają rozwiązanie problemów sterowania, 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.

Dorobek naukowy autora rozprawy obejmuje 17 publikacji, w tym 6 artykułów w czasopismach JCR:

- IEEE Transactions on Industrial Electronics (200 pkt.);
- Aerospace Science and Technology (100 pkt.);
- European Journal of Control (140 pkt.);
- ISA Transactions (140 pkt.);
- Control Engineering Practice (100 pkt.);
- IEEE Transactions on Industry Applications (140pkt.);

oraz 9 w materiałach międzynarodowych konferencji naukowych takich jak:

- 19th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, MixDes, 2012;
- 21st Mediterranean Conference on Control and Automation, 2013;
- IEEE/ASME 10th International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, MESA, 2014;
- 54th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan, 2015;
- 11th International Workshop on Robot Motion and Control, RoMoCo, 2017;
- Polish Control Conference, KKA, 2017
- IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, ACA, 2019
- 59th IEEE Conference on Decision and Control, CDC, 2020
- Polish Control Conference, KKA, 2020

Uwzględniając wymienione osiągnięcia naukowo-badawcze oraz fakt ich opublikowania w wyżej wymienionych pozycjach, uważam że mgr inż. Krzysztof Łakomy 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 teorii sterowania.

IV. Uwagi i komentarze dotyczące rozprawy

Uwagi ogólne:

1. Założenie odnośnie ograniczoności wektora $\mathbf{d}(t)$ zdefiniowane przez nierówności (3.9)-(3.10) są dość restrykcyjne. W rzeczywistości, składowe wektora $\mathbf{d}(t)$ mogą mieć różne zakresy zmienności. Naturalne wydaje się więc przyjęcie ograniczeń elipsoidalnych w miejsce (3.9)-(3.10). Nasuwa to jednocześnie pomysł zastosowania technik kwadratowej ograniczoności (ang. Quadratic Boundedness) do analizy zbieżności/stabilności badanych układów regulacji i obserwacji. Jako przykłady takich rozwiązań można podać:
 - Alessandri, Angelo, Marco Baglietto, and Giorgio Battistelli. "On estimation error bounds for receding-horizon filters using quadratic boundedness." IEEE Transactions on Automatic Control 49.8 (2004): 1350-1355.

- Alessandri, Angelo, Marco Baglietto, and Giorgio Battistelli. "Design of state estimators for uncertain linear systems using quadratic boundedness." *Automatica* 42.3 (2006): 497-502
 - Ding, Baocang. "Quadratic boundedness via dynamic output feedback for constrained nonlinear systems in Takagi–Sugeno's form." *Automatica* 45.9 (2009): 2093-2098.
 - Buciakowski, Mariusz, et al. "A bounded-error approach to simultaneous state and actuator fault estimation for a class of nonlinear systems." *Journal of Process Control* 52 (2017): 14-25.
2. Jaki wpływ na restrykcyjność proponowanego rozwiązania ma przyjęcie diagonalnej macierzy wzmocnień $\mathbf{K}$ w równaniu (3.13)?
 3. Zastosowanie układów obserwacji/estymacji stanu zaproponowanych w punkcie 3.1.2 powinno być poprzedzoną odpowiednią dyskusją odnośnie spełniania zasady separowalności (ang. separation principle) w rozważanym układzie sterowania. Jego spełnienie w układach liniowych/nieliniowych z zakłóceniami nie jest tak oczywiste. Przykład tego typu rozważań dla deterministycznych układów klasy Lipschitza przedstawia praca:
 - Witczak, Marcin, Vicenc Puig, and Saül Montes de Oca. "A fault-tolerant control strategy for non-linear discrete-time systems: application to the twin-rotor system." *International Journal of Control* 86.10 (2013): 1788-1799.
 Jest to szczególnie ważne w kontekście Uwagi 3.6.
 4. Równania (3.17) mają charakter czysto deterministyczny. Jak w kontekście wcześniejszych rozważań dotyczących niepewności modelowania i zakłóceń pomiaru można wytłumaczyć to uproszczenie?
 5. Jaki jest powód wprowadzenia struktury macierzy wzmocnień obserwatora (3.20) z jednym punktem swobody?
 6. Równanie (3.22) posiada człon $\mathbf{f}(\mathbf{i})$, który ma wpływ na zbieżność obserwatora. Autor sprowadza natomiast analizę zbieżności do umieszczenia biegunów $(\mathbf{A}-\mathbf{L}(\mathbf{i})\mathbf{C})$ w lewej półpłaszczyźnie. Nie jest to z pewnością najlepsze rozwiązanie. Alternatywnym podejściem jest użycie założenia (3.10) i zastosowanie techniki kwadratowej ograniczoności (vide pkt. 1) do analizy zbieżności obserwatora (3.19). Takie rozwiązanie daje możliwość zaprojektowania obserwatora o gwarantowanej jakości funkcjonowania.
 7. W Lemacie 4.1, Autor wprowadza skrót ISS bez wcześniejszego podania odpowiednich definicji i motywacji.
 8. Podobnie jak w pkt. 1, założenia (4.29)-(4.30) można zrealizować w postaci kwadratowej ograniczoności.

V. Podsumowanie recenzji

Reasumując, podniesione wyżej uwagi krytyczne i komentarze nie wpływają jednak na wysoką ocenę oryginalnych i opublikowanych osiągnięć naukowo-badawczych, zasadniczych wyników zawartych w recenzowanej pracy oraz jej ogólną pozytywną ocenę, która wyraźnie wykracza ponad poziom przeciętny. Przedstawione wyniki stanowią niewątpliwie rozwiązanie istotnego problemu naukowego, a także dobrze świadczą o erudycji Doktoranta w zakresie teorii sterowania. Stwierdzam zatem, że przedstawiona przez magistra inżyniera Krzysztofa Łakomego rozprawa spełnia warunki określone w artykule 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.

Stwierdzam również, że biorąc pod uwagę osiągnięcia autora przedstawione w dysertacji, jak również związany z nią ciąg publikacji, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgra Łakomego.

Prof. dr hab. inż. Marcin Witczak

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Marcin Witczak', with a long, sweeping horizontal stroke extending to the right.