WYDZIAŁ AUTOMATYKI,
ROBOTYKI I I ELEKTROTECHNIKI
POLITECHNIKA POZNAŃSKA
23 -03- 2021
WPŁYNĘŁO

PRZEWODNICZĄCY RADY DYSCYPLINY
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika
prof. dr hab. inż. Wojciech Szeląg

prof. dr hab. inż. Ignacy Dulęba
Katedra Cybernetyki i Robotyki
Wydział Elektroniki, Politechnika Wrocławska
ignacy.duleba@pwr.edu.pl

Wrocław 2021-03-19

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra inż. Krzysztofa Łakomego
"Kaskadowe układy sterowania odpornego ze sprzężeniem od wyjścia dla robotów mobilnych w zadaniach ruchu przestrzennego: podejście VFO-ADR".

0. Podstawa prawna.

recenzję wykonano na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Poznańskiej, prof. dra hab. inż. Wojciecha Szeląga, zgodnie z uchwałą Rady nr 14/2020-2021, powołującej mnie na recenzenta w przewodzie doktorskim mgra inż. Krzysztofa Łakomego.

1. Charakterystyka ogólna.

Przedłożona do recenzji rozprawa należy tematycznie do dyscypliny automatyka i robotyka, a w szczególności tej jej części dotyczącej robotyki. W rozprawie doktorskiej wielowątkowo (aspekt teoretyczny, symulacyjny i weryfikacja praktyczna) i dogłębnie przedstawiono udane połączenie klasycznych już podejść, a mianowicie: metodologii bazującej na kontrolowanym orientowaniu pól wektorowych (VFO) oraz aktywnemu tłumieniu zakłóceń (ADR). Zadanie sterowania robotem postawiono dla dwóch podstawowych klas zadań robotycznych: śledzenia trajektorii i odtwarzania ścieżki oraz rozwiązano dla obu klas różnicowanych także sterowalnością, czyli układów w pełni dosterowanych oraz niedosterowanych. Kaskadowość przyjętego podejścia wydaje się naturalna, gdyż podział podzadań na część niezależną od efektów dynamicznych (czyli sterownik kinematyczny) oraz tę uwzględniającą dynamikę wynika z jednej strony z własności modelowanego układu, a z drugiej zmniejsza skomplikowanie (złożoność) zadania sterowania. Tytułowe uodpornienie sterowania jest warunkowaną praktycznie niepełną znajomością modelu obiektu sterowanego i/lub zakłóceniami zewnętrznymi.

Wyróżnikiem pracy jest przestrzenność modeli, dla których proponowane są metody sterowania ruchem robota, uwzględniających zaburzenia zewnętrzne. O ile obraz dwuwymiarowy w literaturze robotycznej jest już wyraźny, ze względu na użyteczność plaftorm mobilnych i wieloletnie badania, o tyle trójwymiarowy ciągle wymaga badań. Praktyczność rozważania tych modeli znacznie wzrosła wraz z rosnącą popularnością dronów i robotów penetrujących środowiska (pod-)wodne. Niniejsza praca wnosi wkład właśnie dla przypadku trójwymiarowego, który nie jest li tylko adaptacją metod powstałych dla modeli niskowymiarowych. Wręcz przeciwnie: wzrost wymiaru nie tylko powoduje ponad-liniowy wzrost złożoności obliczeniowej, ale wprowadza nowe aspekty, nieobecne (lub łatwo omijalne) w przypadku dwuwymiarowym: osobliwości oraz niedotrzymywanie ograniczeń (nieholonomicznych) standardowo akceptowanych dla przypadku 2D. Rozważania teoretyczne i badania praktyczne musiały więc wykroczyć poza standardowe ramy analizy kołowych platform mobilnych i sięgnąć do arsenałów innych dziedzin (aktywne tłumienie hałasów, drgań, ogólnie zakłóceń). Praca doktorska stanowi pod-

sumowanie wyników teoretycznych, bazujących na nich badań symulacyjnych oraz weryfikację praktyczną na obiekcie latającym.

Tematykę rozprawy uważam za bardzo aktualną i mającą potencjał praktyczny, gdyż rozważane układy są, lub będą, intensywnie wykorzystywane w praktyce, a ich analiza teoretyczna i wieloaspektowa weryfikacja jest konieczna by ustalić zakres stosowalności metod i wskazać czego można oczekiwać, i na co należy zwrócić uwagę, podczas praktycznych aplikacji.

2. Forma i kompozycja rozprawy.

Rozprawa jest bardzo obszerna i obejmuje 210 stron tekstu podzielonego na siedem rozdziałów głównych, poprzedzonych spisem rysunków, tabel, wykorzystywanych akronimów oraz symboli i oznaczeń, oraz uzupełnionych ósmym rozdziałem zawierającym dodatki. Całości dopełnia bibliografia, liczącą 94 atrybutywnych i współczesnych pozycji dotyczących rozważanych zagadnień.

W Rozdziale 1 Autor przedstawia tło literaturowe i potrzebę praktyczną rozważanego zadania. Zobrazowano ogólny schemat postępowania w sterowaniu obiektami autonomicznymi oraz strukturę kaskadową z wyróżnionymi sterownikami dla pętli wewnętrznej i zewnętrznej. Przedstawiono główne idee paradygmatów na których bazuje projektowany układ sterowania (orientowania pól wektorowych i aktywnego tłumienia zakłóceń). Rozdział zakończono sformułowaniem celu naukowego i zakresu rozprawy. Przedstawiono graficznie czwórpodział podzadań dla poszczególnych klas rozważanych modeli zawierający projekt sterownika, wykazanie jego własności, przetestowanie symulacyjne i weryfikację praktyczną.

W krótkim rozdziale 2 wprowadzono opis obiektu sterowania w układach globalnym i lokalnym, oraz podano definicje istotnych oznaczeń. Wymieniono założenia dla obydwu zadań sterowania, łącznie z wersjami aktywacji i deaktywacji sygnałów sterujących (konstytuujących przypadek dosterowany i niedosterowany), oraz przedstawiono definicje ścieżek zadanych (w postaci parametrycznej oraz nieparametrycznej).

W głównym, z merytorycznego punktu widzenia, rozdziale 3 Autor przedstawia teorię konstrukcji autorskich sterowników: dynamicznego (pętla wewnętrzna) i kinematycznego (pętla zewnętrzna). W pętli wewnętrzej, wyrażając prędkość zmian uchybu błędu prędkości jako funkcję części kontrolowalnej dynamiki i części podlegającej zakłóceniom (parametrycznym i nie) szacuje (określając najniekorzystniejsze warunki przy przyjętych założeniach) ich wielkości (korzystając z adaptowanego obserwatora stanu rozszerzonego) i wykazuje, że nie zaburzają one właściwej asymptotycznej zbieżności błędów. Wykazuje również, że sprzężenie zwrotne wymaga jedynie konfiguracji, a nie całego wektora stanu. W warstwie technicznej Autor korzysta z szacowań górnych wielkości skalarnych i macierzowych, a dla pokazania zbieżności intensywnie wykorzystuje klasyczną technikę funkcji Lapunowa.

Dla sterownika kinematycznego zmniejszono liczbę wymiarów zadania przez założenie torpedopodobnego ruchu pojazdu wymuszając utrzymywanie zerowej wartości jednego z kątów orientujących pojazd. Również i na tym etapie wykorzystano estymowanie niedokładnie znanych wielkości (tu pola orientującego pojazd). Pokazano, jak dla układów niedosterowanych można częściowo wpływać na niekontrolowany dryf w dwóch osiach.

W rozdziale 4 Autor wykazuje, że wyprowadzone w rozdziale poprzednim równania sterowników pozwalają na uzyskanie stabilności typu wejście-stan dla układu sterowania pojazdem. Sformułowano ogólne i autorskie twierdzenie określające warunki realizowalności odpornego zadania sterowania przez układ kaskadowy dla dwóch wymienionych uprzednio zadań. Szeregiem lematów dowodzone są własności układu sterowania przez badanie dynamiki uchybów dla

elementów wpływających na poszczególne jego podsystemy. Ekonomicznie podzielono część dowodową na wspólną dla zadania śledzenia trajektorii i odtwarzania ścieżki oraz je różnicującą.

W rozdziale 5. przeprowadzono weryfikację symulacyjną wyników teoretycznych ze szczególnym uwzględnieniem wielu parametrów projektowych, które należy dobrać dla poszczególnych sterowników. Jakość sterowania oceniono przy pomocy wskaźników całkowych opisujących błędy oceny zaburzenia całkowitego, błędy śledzenia położenia i orientacji pojazdu, czy energię sterowania. Przetestowano sam sterownik kinematyczny pokazując jego skuteczność (błędy na poziomie numerycznym 10^{-13}), a następnie dodając także sterownik pętli wewnętrznej w wersji dla układu dosterowanego i niedosterowanego. Sformułowano wnioski częściowe pokazując wpływ ilościowy poszczególnych parametrów na sposób i jakość realizacji zadania sterowania. Zwrócono także uwagę na wrażliwość sterownika VFO-ADR na szumy pomiarowe, formułując zalecenie dla testów na obiekcie rzeczywistym. Tego zjawiska nie można było przewidzieć w wyniku przeprowadzonej analizy teoretycznej.

W rozdziale 6 przedstawia Autor weryfikację praktyczną opracowanych sterowników na rzeczywistym obiekcie, będącym pokaźnych rozmiarów sterowcem. Parametry obiektu wymusiły mało obszerne trajektorie i ścieżki zadane. Przeprowadzone serie pomiarów wykazały dobrą skuteczność tłumienia błędów, szczególnie dla współrzędnych położeniowych. Mała obszerność manewrów ułatwiła również dobrą lokalizację sterowca przy pomocy zewnętrznego, wizyjnego systemu śledzącego.

W ostatnim merytorycznym rozdziale 7 podsumowano osiągnięcia dysertacji, po którym następuje rozdział 8 zawierający głównie obliczenia pomocnicze.

Praca doktorska bazuje na wcześniejszych pracach współautorskich ujednoliconych i poszerzonych. Sumarycznie dorobek Autora stanowi siedem prac, w tym trzy w bardzo dobrych czasopismach (ISA Transactions, Europ. J. Control, IEEE Trans. on Industry and Applications) oraz znaczących konferencjach krajowych i zagranicznych. Dorobek naukowy należy uznać za bardzo dobry oraz świeżej daty: dwie ważne prace pochodzą z roku 2020. Praca doktorska wyróżnia się starannością i precyzyjnością (twierdzenie, lematy) oraz atrakcyjnością prezentacji graficznej. Wymagała od Autora wielowątkowości (teoria, symulacje, praktyka), czyli trudnego uniwersalizmu.

3. Wyniki uzyskane w rozprawie.
Za oryginalne osiągnięcia Autora uważam:

- Przeniesienie metodologii VFO do przestrzeni trójwymiarowej, z uwzględnieniem zjawisk nie występujących w dwóch wymiarach.
- Adaptację metody ADR do zadań śledzenia ścieżki czy realizacji zadanej trajektorii w celu uzyskania odporności na niekontrolowane zakłócenia.
- Udowodnienie własności sterowników (twierdzenie i lematy pomocnicze z rozdz. 4) przy realistycznych (praktycznych) założeniach.
- Wykazanie, że można uzyskać właściwą jakość realizacji zadania korzystając jedynie z informacji zwrotnej o konfiguracji poruszającego się obiektu.
- Przeprowadzenie symulacji potwierdzających z jednej strony wyniki teoretyczne, a z drugiej wskazujące na potencjalne problemy, które na gruncie teoretycznym wymagałyby poszerzonej analizy wrażliwościowej.

- Weryfikację praktyczną na rzeczywistym obiekcie.

Praca doktorska jest bardzo dobrze napisana (również edycyjnie), z dbałością o oznaczenia (kroje pisma wyróżniające obiekty, co ułatwia pracę recenzentom i ułatwia lekturę czytelnikom). W lekturze jest jednak dość trudna, ze względu na sporą liczbę wzorów i ciągów szacowań.

4. Kwestie do dyskusji, komentarze, uwagi polemiczne.

Uwagi, pytania i komentarze merytoryczne (przyjęto następującą konwencję odnoszenia do tekstu: a^b/a_b strona a wiersz b od góry/dołu):

1. Definicja ścieżki nieparametrycznej wymaga stosunkowo wielu założeń, a parametryczna nie. Czy zatem preferowanie nieparametrycznych ścieżek nie stanowi pomniejszenia rezerwuaru dopuszczalnych ścieżek?
2. Założenie o stałości macierzy bezwładności $\boldsymbol{M}$, wzór (2.7) wydaje się silne i wykluczające (lub nieistotność) obiektów ruchomych przenoszonych przez robota (np. sterowany chwytak). Jak duże mogłyby być kłopoty, gdyby uwzględnić zależność macierz $\boldsymbol{M}$ od np. konfiguracji manipulatora przenoszonego przez platformę? Oczywisty jest wzrost wymiaru zadania, ale czy coś istotnego ponadto?
3. Czy podczas badań symulacyjnych wystąpiły problemy natury numerycznej, bowiem macierz $\boldsymbol{J}$ może mieć potencjalnie bardzo duże elementy, a wchodząc do zależności na składnik $\boldsymbol{d}$ przechowujący skumulowane i przetworzone zaburzenia może powodować bardzo duże wartości stałych występujących w górnych szacowaniach.
4. Dlaczego wykluczono kwaterniony jednostkowe do reprezentacji współrzędnych kątowych (wtedy mogłyby być pseudo-odwrotności $\boldsymbol{J}$ zamiast $\boldsymbol{J}^{-1}$) i większość kłopotów z reprezentacją kątów by się rozwiązała.
5. Podając definicję ścieżki referencyjnej (str. 33^{1-9}) Autor opisuje wartość parametru ustalonego dla powierzchni $s_1(\boldsymbol{\eta}) = s_2(\boldsymbol{\eta}) = const \neq 0$ jako pewną miarę "odległości" od ścieżki referencyjnej. Dość łatwo można zmienić geometrię jednej powierzchni $\tilde{s}_1(\boldsymbol{\eta}) = -s_1(\boldsymbol{\eta})$. Czy może to mieć istotny wpływ na skuteczność działania metody szczególnie, gdy powierzchnie s_1, s_2 są prawie równoległe?
6. (str. 21_2) Dlaczego wprowadzając dziedzinę dla dopuszczalnych kątów inaczej jest traktowany kąt $\psi \in \mathbb{R}$ niż pozostałe kąty (θ oczywiście ograniczony przez wykluczenie osobliwości)? Zob. np. 28_9.
7. Terminologiczna: kąty Eulera tradycyjnie przyjmowane są jako ZYZ, a np. u Corka eulerowskimi są zwane wszystkie zawierające dwie "identyczne" osie ruchu (np. XYX). Zatem wykorzystywane przez Autora kąty RPY (w wersji XYZ) wydaje się lepiej nie nazywać kątami Eulera.
8. (str. 28) Nie widzę własności z Uwagi 2.5: wg moich obliczeń jest $rot(y,\theta)rot(z,\psi)[0,1,0]^T = [-c\theta s\psi, c\psi, s\theta s\psi]^T \neq [**const]^T$.
9. Czy warunek (2.61) dotyczący ograniczenia amplitudy błędu orientacji może mieć (ma) charakter aktywny? Konkretniej: czy można ograniczenie górne ustawić na stosunkowo małą wartość? Jak małą?
10. W rozważaniach str. 47, o ograniczeniach wynikających z potencjalnego zerowania mianownika w (3.27) przyjęto jako sposób działania zamrażanie wartości, gdy długość wektora pola zbieżności jest zbyt mała. Czy to może oznaczać możliwość zmiany kierunku ruchu

pojazdu, oraz czy po "rozmrażaniu" mogą wystąpić kłopoty z istotną nieciągłością?

Uwagi techniczne, językowe, redakcyjne:

1. kąty roll-pitch-yaw – są ładne polskie odpowiedniki: kiwanie, kołysanie, myszkowanie.
2. 8_3 dynamiki wektora stanu robota $\rightarrow$ wektora stanu robota uwzględniającego dynamikę (precyzyjniej).
3. 20^4 odwrócenie $\overline{a}$ i $\underline{a}$.
4. 19_{15-16} skoro wektory własne są zespolone, to dookreślenia wymaga pojęcie największe/najmniejsze (długość, część rzeczywista?). Niejednoznaczość znika, gdy macierz $\boldsymbol{A}$ jest szczególna.
5. W bibliografii niektóre pozycje bez podania stron [69,83,84].
6. Nieliczne literówki i drobne błędy językowe: 33_{15}, 50^5, 55_9.

Przedstawione uwagi czy komentarze mają charakter głównie porządkowy i nie wpływają ani na prawdziwość tezy dysertacji ani na jej rangę naukową.

5. Konkluzja.

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgra inż. Krzysztofa Łakomego wyrażam opinię, że jej Autor wniósł oryginalny wkład do dyscypliny Automatyka i Robotyka. Problemy sformułowane w dysertacji są aktualne i ważne praktycznie. Autor wykazał, że opanował odpowiednio warsztat naukowy, posiada wiedzę i sprawność zarówno na poziomie implementacyjnym jak i praktycznym. Udokumentowany w rozprawie doktorskiej wkład Autora w rozwój wiedzy (aspekt poznawczy) i możliwości jej potencjalnego zastosowania (aspekt praktyczny) należy uznać za duży.

Stwierdzam zatem, że **przedłożona do recenzji rozprawa spełnia wymagania zawarte w ustawie o stopniach i tytule naukowym oraz stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Łakomego do publicznej obrony.**

