

prof. dr hab. inż. Dariusz Horla
Instytut Robotyki i Inteligencji Maszynowej
Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki
Politechnika Poznańska

Poznań, dnia 10. października 2024 r.

S E K R E T A R I A T
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 11.10.2024

Zarejestrowano pod nr 310-9-2/13

Podpis Ohm

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: **Algorytmy sterowania zespołem robotów mobilnych i ich implementacja**

Autor rozprawy: **mgr inż. Dawid Knapik**

Promotor rozprawy: **prof. dr hab. inż. Andrzej Turnau**

Dziedzina: **nauki inżynieryjno-techniczne**

Dyscyplina: **automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne**

1. Podstawa formalna opracowanej recenzji, przedmiot recenzji

Recenzja została opracowana w odpowiedzi na pismo dr. hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH z dnia 4 lipca 2024 r., Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

Przedłożona do oceny rozprawa została przygotowana w formie monograficznej, składa się z części zasadniczej, zawierającej przedstawienie i charakterystykę głównych osiągnięć oraz wyników uzyskanych przez Doktoranta, załączników zawierających kody skryptów oraz spisu literatury.

2. Uwagi ogólne

Tematyka rozpatrywana w opiniowanej rozprawie dotyczy rozproszonego sterowania obiektów rzeczywistych – systemu wieloagentowego, na przykładzie robotów mobilnych – współpracujących w osiągnięciu postawionego przed nimi zadania jakim może być tranzycja do nowego punktu lub utworzenie i utrzymanie formacji. Zgodnie z założeniami zamieszczonymi we wstępie opiniowanej rozprawy, roboty podlegają sterowaniu lokalnemu w oparciu o ich lokalne położenie, a więc podobnie jak w przypadku praktycznych metod pozycjonowania bezzałogowych statków powietrznych w środowisku uniemożliwiającym dostęp do danych GPS. Stosownie do zamieszczonych wyników, ruch robotów w założonej formacji i efektywność rozważanych schematów sterowania podlegała zarówno badaniu symulacyjnemu, jak i weryfikacji eksperymentalnej, co przy uzupełnieniu wyników we wczesnych rozdziałach pracy o rozważania teoretyczne i własności metod sterowania skutkuje powstaniem pełnej triady: analiza formalna – symulacja – eksperyment. Mimo wszczęcia Kandydatowi przewodu doktorskiego w 2013 tematyka badań jest aktualna, uzyskane wyniki interesujące, a wnioski mogą stanowić inspirację do dalszych badań.

Spśród wielu metod sterowania rozproszonego, znanych z pola robotyki mobilnej, Autor skupia się na zastosowaniu wirtualnych potencjałów między sąsiadującymi robotami oraz teorii grafów, obrazującej następstwo działań poszczególnych robotów. Zastosowane podejście zachowuje wszystkie cenne cechy sterowania rozproszonego, co Autor ujął na początku pracy, czyli własność skalowalności na większą liczbę jednostek, czy odporność na awarię centralnego źródła decyzji (przez jego brak) lub wystąpienie lokalnych awarii. Zagadnienie samej odporności czy awarii nie zostało jednak bezpośrednio poruszone w rozprawie.

Takie sterowanie formacją ma na celu utrzymanie określonych pozycji względnych i jest przedmiotem bieżących badań, raportowanych w literaturze światowej, w odniesieniu do osiągania sterowania zapewniającego konsensus, sterowania grupą/rojem robotów, zagadnienia synchronizacji czy problemu rendez-vous. Dodatkowo, tak utworzona formacja może być docelowo potraktowana jako całość i wykonywać zadania jakich pojedynczy robot mobilny nie byłby w stanie wykonać, przykładowo transportowanie obiektów (patrz: np. zadania typu latający dźwig).

Celem opiniowanej rozprawy jest skonstruowanie algorytmów sterowania rozproszonego dla układu wieloagentowego (tj. autonomicznych robotów mobilnych), przy czym układ ten ma osiągać zdefiniowaną formację wyrażoną w funkcji względnego położenia między jednostkami. Jako cel drugorzędny określono budowę środowiska sprzętowo-programowego, które umożliwi przetestowanie algorytmów sterowania na grupie robotów mobilnych. Praca nie zawiera jasno sformułowanej tezy, co ma zapewne związek z horyzontem czasu, w jakim prowadzono badania, niemniej jednak Doktorant konsekwentnie zmierza do przedstawienia raportowanego w rozprawie rozwiązania dotyczącego sterowania formacją.

Zakres pracy wynikający z przedstawionego celu rozprawy jest szeroki i obejmuje następujące zagadnienia:

- a) przegląd algorytmów sterowania formacją robotów,
- b) wyprowadzenie kompletnego modelu dwukołowego robota mobilnego o niestabilnej dynamice,
- c) analiza i omówienie wyników z eksperymentów symulacyjnych i rzeczywistych,
- d) podsumowanie uzyskanych wyników, przedstawienie problemów otwartych i nakreślenie ścieżki dalszych badań.

Szczegółowe rozwinięcie wyżej wymienionych zagadnień stanowi właściwą treść rozprawy, a jej część wstępna zawiera informacje o istocie problemu będącego przedmiotem pracy, o zamierzonym sposobie jego rozwiązania, a także zawiera formalne dowody zbieżności do oczekiwanego rozwiązania zadań w problemie cyklicznej pogoni, śledzenia lidera czy sterowania formacją.

Zaprezentowane wyniki są przedstawione w sposób pozwalający na weryfikację oraz ocenę efektów osiągnięcia postawionych celów, tematyka rozprawy jest aktualna i dotyczy zagadnień naukowych o istotnej wartości użytecznej, a jej podjęcie uważam za w pełni uzasadnione.

Rozprawa ma głównie charakter eksperymentalny (choć nie uniknięto rozważań teoretycznych), a dalsze plany badawcze Doktoranta jasno wskazują na perspektywy rozwoju uzyskanych w niej wyników i aktualność problemu.

3. Przedmiot, zakres i ocena merytoryczna pracy

3.1. Zawartość rozprawy

Wstęp (rozdział 1.) rozprawy zawiera uzasadnienie podjęcia tematyki badań przez Autora, wychodząc od osadzenia zadania sterowania w szerszym kontekście przez przegląd literatury, w tym w odniesienia do kolektywnego zachowania zwierząt, przedstawiając cztery podejścia do sterowania formacją robotów kończąc na podaniu zastosowań proponowanych rozwiązań.

Rozdział 2. dysertacji zawiera informacje wprowadzające, systematyzujące stosowaną nomenklaturę, przedstawiając podstawowe definicje z zakresu teorii sterowania. Następnie, w rozdziale zamieszczono opis matematyczny zespołu robotów z wykorzystaniem podejścia grafowego (w tym grafu skierowanego mającego zastosowanie w rozprawie). Zacytowano dodatkowe definicje jak definicja dotycząca strukturalnej sztywności grafu.

Rozdział 3. dotyczy przykładów wprowadzających do zagadnienia formalizacji algorytmu sterowania zespołem robotów mobilnych. Autor przedstawia trzy przykłady zapowiadające złożoność postawionego zadania w postaci: wymogu utrzymania stałej odległości przez parę agentów, zadania cyklicznej pogoni dla trzech robotów, z jednokierunkową wymianą informacji, a także utrzymanie formacji w oparciu o informację dot. względnego położenia agentów. Do każdego z przypadków przedstawiono formalny opis matematyczny, wraz z wynikami badań symulacyjnych.

Rozdział 4. pracy szczegółowo omawia algorytmy sterowania zespołem robotów nieholonomicznych, ze szczególnym uwzględnieniem jednostek dostępnych w laboratorium Robotarium, w którym Doktorant zdalnie prowadził eksperymenty. Nagrania z tych eksperymentów zostały umieszczone pod odpowiednimi odnośnikami, co pozwala na wgląd w ich przebieg. W przeprowadzonych na tym etapie badaniach dotyczących jednak robotów klasy (2,0) z kołem podporowym, w odróżnieniu od finalnych wyników dotyczących robotów o niestabilnej dynamice, powrócono do algorytmów z poprzedniego rozdziału.

W **rozdziale 5.** Zawarto właściwą część pracy, przedstawiając algorytmy sterowania grupą robotów o niestabilnej dynamice, zaczynając od platform dostępnych komercyjnie (Turtlebot, QBot), a kończąc na znanych rozwiązaniach dla autonomicznych pojazdów dwukołowych. W tym rozdziale, Doktorant przedstawia model rozważanego robota mobilnego, opisując platformę sprzętową, za której powstanie był odpowiedzialny w projekcie NCBiR, rozwiązania programistyczne od strony automatycznej generacji kodu, metodologie projektowania w oparciu o podejście model-in-the-loop oraz hardware-in-the-loop, kończąc na przedstawieniu modelu dynamicznego robota o charakterze odwróconego wahadła. Co ważne, fizyczne wartości parametrów opracowanego modelu zostały odpowiednio wyestymowane, wprowadzając ostatecznie regulator typu LQ do stabilizacji robota w niestabilnym punkcie równowagi. Dalej, w rozdziale zaprezentowano wyniki symulacji dla idealnych warunków pracy, ponownie realizując zadania jak w poprzednich rozdziałach.

Podsumowanie i wnioski w rozdziale 6. odnoszą się do realizacji celów cząstkowych i formułują zestaw otwartych zagadnień.

Ostatnia część rozprawy (**Bibliografia**) zawiera 111 pozycji, w tym 2 pozycje współautorstwa Autora. Wyłączając instrukcje, karty katalogowe i noty aplikacyjne: około 14% pozycji literaturowych jest z ostatnich 5 lat, około 20% z przedziału 6-10 lat, około 33% z przedziału 11-20 lat, natomiast 29%

– starszych niż 20 lat. Bibliografia stanowi reprezentatywny przegląd prac poświęconych zagadnieniom stanowiącym temat rozprawy doktorskiej, uwzględniając najnowsze wyniki badań, do których odnosi się Autor, ale również przedstawiając referencję do klasycznej literatury.

3.2. Merytoryczna ocena pracy

Celem rozprawy jest zaprojektowanie algorytmów sterowania rozproszonego dla układu wieloagentowego (autonomicznych robotów mobilnych) w zadaniu tworzenia formacji. Realizacja tego celu wymagała wykonania szeregu eksperymentów, przeprowadzenia procesów modelowania matematycznego czy w końcu wykonania krytycznej analizy uzyskanych wyników.

Do najważniejszych osiągnięć badawczych pracy zaliczam:

- przeprowadzenie dogłębnej analizy, weryfikacji i implementacji rozproszonych algorytmów sterowania zespołem robotów,
- przeprowadzenie formalnego dowodu asymptotycznej stabilności układu sterowania dla wybranych konfiguracji agentów i określenie obszarów przyciągania do atraktorów będącymi punktami równowagi układów.

Na podkreślenie zasługuje staranność Autora w prezentowaniu i opisie wprowadzanych pojęć, głęboka wiedza praktyczna, walor poznawczy licznych rysunków umożliwiających łatwe śledzenie toku pracy, a waga niezręczności edycyjnych jest mało istotna. Rysunki są celowo dobrane i zasadniczo dobrze dopracowane graficznie.

W trakcie czytania pracy nasunęły mi się następujące uwagi krytyczne o charakterze ogólnym:

- 1) na ile zmieniłyby się wyniki eksperymentu, gdyby założyć wykonanie ruchu przez robota 1, czy byłyby problemy z utrzymaniem formacji w ruchu (s. 56, rys. 4.13)? Czy pętla regulacji położenia sprowadziłaby wartości uchybów ustalonych do zera? Jeżeli tak, to dla jakiego profilu zmian położenia robota 1?
- 2) proszę o omówienie metodologii doboru/strojenia nastaw regulatora typu PD (s. 58) – jakie przyjęto kryterium doboru nastaw, dlaczego regulator zawiera wyłącznie składową zależną od pomiaru położenia i prędkości, jak wygląda możliwość uzyskania uchybu ustalonego w zadaniu śledzenia, gdy lider porusza się? Podobnie, proszę o odpowiedź odnośnie założeń prezentowanych na s. 114;
- 3) dlaczego nie zdecydowano się finalnie na fuzję danych pomiarowych do odtworzenia prędkości kątowej obrotu wokół osi poziomej (s. 93)?
- 4) proszę o analizę skąd gwałtowne ruchy blisko punktów końcowych trajektorii oraz czy nie wynikają one z doboru wag w kryterium projektowym regulatora (s. 107)? Jak można takim ruchom zaradzić w praktyce, w szczególności w obliczu niepewnych pomiarów położenia, czy opóźnień komunikacyjnych?
- 5) skoro nadążanie za zadaną trajektorią nie jest wymagane do realizacji algorytmów sterowania (patrz: s. 98), to czy wprowadzanie układu regulacji wielopętlowej (zewnątrzna pętla regulacji dla sygnałów położenia) dla układów śledzenia lidera ma jakikolwiek sens?
- 6) czy można (s. 126) określić spodziewany wpływ na dynamikę i jakość nadążania w formacji za liderem, gdy zostanie użyty nieprecyzyjny sposób pomiaru względnej odległości/położenia? Czy istnieje możliwość przedstawienia wyniku choćby badania symulacyjnego, gdy pomiar jest obciążony błędem (występuje szum pomiarowy), a macierze definiujące zachowanie układu regulacji, jak w (5.91) dobrano tak, aby zwiększyć odporność jakości sterowania?

- 7) proszę o podanie metodologii doboru macierzy wagowych w (5.91), dot. s. 95 – z jakimi maksymalnymi amplitudami poszczególnych składowych wektorów występujących w przedmiotowym wzorze się spotykamy i w związku z tym co odzwierciedla taki a nie inny dobór? Co gdyby wybrane składowe tych macierzy na głównej przekątnej zmienić?

Podział tekstu rozprawy na rozdziały jest prawidłowy, materiał ilustracyjny jest bogaty i czytelny, a przedstawiona bibliografia jest reprezentatywna dla problematyki poruszanej przez Autora.

Praca nie zasadniczych wad, można jednak wykazać drobne uchybienia lub elementy dyskusyjne:

- s. 1⁸: badanie praktyczne to badanie eksperymentalne;
- s. 3¹²: sformułowanie „chwila czasu” jest nieprawidłową kalką z terminu angielskiego „time instant” – po prostu „chwila”;
- s. 13, Definicja 2.3 – czy na etapie formułowania ogólnej postaci równania różniczkowego jest ważne już odniesienie się do stanu, skoro nie wprowadza się od razu formalnego opisu w przestrzeni stanu?
- s. 14⁶: lapsus językowy prowadzący do tego, iż „zmiennosc procesu” można by zrozumieć jako niestacjonarność np. jego dynamiki, a nie tylko jako podanie algorytmu zmiany wartości pewnego wektora; dodatkowo, linijkę niżej jako $x(t)$ określono przyszły stan procesu, a jest nim zdecydowanie stan bieżący;
- s. 15²: pierwiastki równania charakterystycznego opisującego zachowanie układu określają również nieistotne (tj. zdominowane) własności dynamiki rozważanego układu;
- s. 16²: wielkość $x(t, a)$ jako funkcja dwuargumentowa jest w pracy niezdefiniowana;
- s. 16¹²: w odniesieniu do s. 13 wielkość $\|b - a\|$ nie jest zdefiniowana, nie ma odniesienia czy jest ona tym samym co $\|a, b\|$;
- s. 17¹: mówi o pierwszej metodzie Lapunowa, a ostatnie zdanie Definicji 2.10 – o punkcie równowagi układu;
- s. 17₁: dlaczego Autor rozbił wartości rzeczywiste na mniejsze od zera lub równe zero, zamiast napisać wprost – niedodatnie?
- s. 18, Definicja 2.13 – składnik $x^T Q x$ nie obrazuje funkcji strat związanych z niedotrzymaniem stanu zadanego, który tu jest niezdefiniowany, a jedynie stanu zerowego, lub tych jego składowych, które są penalizowane przez odpowiedni dobór macierzy Q ;
- s. 32⁶: odnosi się do odległości między robotami, dystans jest tutaj niepotrzebną kalką z języka angielskiego;
- s. 32, wzór (3.30): brakuje zdefiniowania operatora podwójnego nawiasu kwadratowego;
- s. 40³: czy w zadaniu tworzenia formacji nie oczekujemy wręcz, że uzyskamy określony uchyb położenia względnego?
- s. 56³: chodzi tutaj nie o zewnętrzną pętlę zwrotną, ale zewnętrzną pętlę sprzężenia zwrotnego;
- s. 57⁴: nadmierne uproszczenie – nie chodzi o prostą trajektorię (czym jest skomplikowana?), ale o trajektorię w postaci linii prostej;
- s. 57, rys. 4.14 (i podobne): nie pozwala odczytać/rozróżnić z przebiegów położenia robotów składowych X oraz Y , które mają ten sam kolor, nie mając nawet rozróżnienia za pomocą dodatkowych znaków graficznych;
- s. 67₁: nie pozwala stwierdzić niewtajemniczonemu czytelnikowi, czy samolot F16 cechuje się stabilną czy niestabilną dynamiką?

- s. 69₆: w terminologii zastosowano zbytne uproszczenie językowe – tu właśnie jest forma prawidłowa – chodzi o stabilizację robota w niestabilnym punkcie równowagi, a nie o sterowanie robotem niestabilnym;
- s. 94: czy możemy mówić jeszcze o sterowaniu typu LQ, skoro zostały wprowadzone dodatkowe składowe wektora stanu odnoszące się do odpowiednich całek, co prowadzi do sterowania typu LQI;
- s. 96⁷: model nie jest zbieżny, ale sygnał wyjściowy z tego modelu – może już być;
- s. 97₃: zdanie jest trudne do zrozumienia, czy chodzi o układ zamknięty z modelem oraz układ zamknięty z rzeczywistym obiektem (eksperyment typu HITL)?
- s. 118, rys. 5.40 (i podobne): na legendzie nie zaznaczono który robot jest liderem;
- Bibliografia – widoczna jest dowolność w sposobie podawania autorów (por. [35] i [39]), zakresów stron ([34] i [42]) czy numerów tomów ([36], [7]), co wynika zapewne ze stosowania BiBTeX-a.

4. Ocena końcowa i wniosek

Mimo przedstawionych powyżej uwag krytycznych, które nie dotyczą zasadniczego dorobku Doktoranta, uważam, że postawiony cel pracy ma charakter naukowy i został zrealizowany. Praca stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego, Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowo-badawczej, ma bardzo dobre przygotowanie w zakresie wykorzystania narzędzi informatycznych, sposób planowania i prowadzenia eksperymentów oraz opanował ogólną wiedzę teoretyczną umożliwiającą prawidłowe wykorzystanie metod i narzędzi teorii sterowania w zadaniach praktycznych.

Wobec powyższych uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Dawida Knapika *Algorytmy sterowania zespołem robotów mobilnych i ich implementacja* spełnia właściwe ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim oraz mieści się w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.



/Dariusz Horla/