

Warszawa, 19.06.2023

dr hab. inż. Edyta Ładyżyńska-Kozdraś, prof. uczelni
Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki
02-525 Warszawa, ul. Św. A. Boboli 8

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

pt.: *Modelowanie ruchu i synchroniczne sterowanie grupą robotów mobilnych o strukturze rozproszonej*

autor: **mgr. inż. Michał Siwek**

promotor: dr hab. inż. Leszek BARANOWSKI

promotor pomocniczy: dr inż. Jarosław PANASIUK

Podstawa formalna opracowania recenzji

Pismo z dnia 4 maja 2023 r. Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna pana prof. dr hab. inż. Jerzego Małachowskiego z informacją o powołaniu na recenzenta na posiedzeniu Rady Dyscypliny w dniu 19 kwietnia 2023 r.

1. Aktualność problematyki badawczej

Aktualny trend w robotyzacji procesów transportowych skupia się na wykorzystaniu do wykonania skomplikowanych zadań grupy współpracujących robotów. Dużą uwagę zwracają grupy robotów o strukturze rozproszonej, szczególnie w przypadku transportu ładunków o dużych gabarytach. W tych zadaniach istotne jest utrzymanie zdefiniowanego szyku geometrycznego grupy, bez możliwości względnej zmiany pozycji robotów. Dokładność utrzymania szyku podczas ruchu oraz precyzja końcowego położenia grupy po wykonaniu zadania mają kluczowe znaczenie dla skutecznego załadunku i rozładunku transportowanego towaru. Tym samym uważam, że podjęta przez mgr. inż. Michała Siwka próba poprawy parametrów ruchu grupy robotów, poprzez wprowadzenie w systemie sterowania synchronizacji czasowej jednostek, jest istotnym elementem w projektowaniu algorytmów sterowania grupą robotów o strukturze rozproszonej, stanowiąc aktualny i ważny kierunek badań.

Realizacja postawionego celu wymagała zrealizowania kilku zadań cząstkowych związanych z wyborem i analizą obiektu badań, opracowaniem modeli teoretycznych wybranego obiektu badań oraz opracowaniem algorytmu sterowania grupą rozproszoną wybranych robotów. Jako obiekty testowe wybrano grupę robotów mobilnych TURTLEBOT 2, będących na wyposażeniu laboratorium Zakładu Mechatroniki Instytutu Techniki Rakietowej i Mechatroniki WAT. Zaprezentowana w pracy nowatorska metodyka badawcza stanowi połączenie określonych na podstawie badań doświadczalnych opóźnień analizowanych robotów mobilnych z procesem modelowania teoretycznego dynamiki i kinematyki ruchu grupy analizowanych robotów, traktowanych jako obiekty z nałożonymi więzami reonomicznymi.

Uważam, iż uczynienie tej problematyki przedmiotem rozprawy doktorskiej jest ciekawym wyzwaniem, którego rozwiązanie jest podstawą uzyskania stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

2. Charakterystyka rozprawy

Układ pracy stanowi logiczną całość, a zawarte w poszczególnych rozdziałach treści są proporcjonalne do wagi prezentowanej w nich problematyki. Przedstawiona dysertacja obejmuje 228 stron tekstu, w tym w kolejności: dwustronicowy wykaz ważniejszych oznaczeń stosowanych w pracy, pięciostronicowy wstęp, sześć obszernych rozdziałów zasadniczych, sześciostronicowy rozdział zawierający podsumowanie i wnioski końcowe, dwa krótkie, łącznie trzystronicowe załączniki oraz literaturę obejmującą 132 pozycje wyszczególnione w kolejności alfabetycznej. Praca nie zawiera streszczenia, ani też wykazu rysunków i tabel.

Rozprawa pod względem redakcyjnym została opracowana i wykonana w sposób staranny. Na podkreślenie zasługuje fakt, iż każdy rozdział zakończony jest podrozdziałem zawierającym merytoryczne wnioski, które podsumowują zawarte w rozdziale treści.

We wstępie Autor skupił się na wyjaśnieniu wyboru problematyki badawczej oraz sformułował cel pracy, którym było „opracowanie algorytmu synchronicznego sterowania grupą robotów mobilnych o strukturze rozproszonej”, a także określił pięć zadań badawczych stanowiących syntetyczny opis planowanych do zrealizowania w ramach dysertacji prac.

W rozdziale 1. Doktorant przeprowadził analizę literaturową poświęconą przeglądowi obecnie stosowanych algorytmów sterowania i wymiany informacji w grupie robotów. Naświetlona przez Autora analiza stanu wiedzy i trendów rozwojowych na temat badanego zagadnienia wyjaśnia sformułowany cel naukowy pracy. Analizując metody sterowania, Autor zauważył możliwość poprawy parametrów ruchu grupy robotów poprzez wprowadzenie synchronizacji czasowej jednostek w systemie sterowania.

W rozdziale 2. Zaprezentowany został wybrany obiekt badań, w postaci grupy robotów TURTLEBOT 2, które znajdują się na wyposażeniu Laboratorium Zakładu Mechatroniki Instytutu Techniki Rakietowej i Mechatroniki Wojskowej Akademii Technicznej. Wybrane roboty współpracują z systemem operacyjnym Linux i platformą Robot Operating System – w oparciu o którą opracowano przedmiotowy system sterowania. W rozdziale Autor opisał modyfikacje, którym należało poddać roboty, aby móc prowadzić dalsze szczegółowe badania. Po określeniu uproszczeń modelu fizycznego Doktorant opracował model kinematyki, dynamiki oraz przeprowadził identyfikację modelu dynamicznego pojedynczego robota. Następnie opracowany model matematyczny został zwalidowany, czego podsumowaniem była analiza wrażliwości poszczególnych jego parametrów. Rozdział kończy opracowany przez Doktoranta teoretyczny model grupy robotów o strukturze rozproszonej.

Na podkreślenie zasługuje tu przeprowadzona identyfikacja nieznanych parametrów modelu dynamicznego, którą Doktorant przeprowadził przy wykorzystaniu połączenia identyfikacji online metodą RLS wspieraną metodą identyfikacji offline oraz opracowany model matematyczny grupy robotów o strukturze rozproszonej uwzględniający opóźnienia czasowe sygnałów sterujących.

W rozdziale 3., w celu oceny błędów wywołanych opóźnieniami transmisji danych sterujących, Doktorant przeprowadził badania dokładności pozycjonowania analizowanej grupy robotów. W przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych Autor wykazał, że na opóźnienia transmisji mają wpływ zastosowane narzędzia do transmisji bezprzewodowej oraz, że multiplikowanie robotów w grupie powoduje wzrost opóźnień transmisji z każdym dodanym robotem. W dalszej części rozdziału Doktorant zawarł badania symulacyjne obejmujące analizę wpływu opóźnień sygnałów sterujących na ruch grupy robotów oraz wzajemnego oddziaływania w trakcie transportu ładunku poszczególnych robotów analizowanej struktury. Badania wykazały, że nawet

niewielkie opóźnienia czasowe (rzędu 300 - 500 ms) w transmisji sygnałów sterujących mają znaczący wpływ na osiągnięte przez roboty położenie skutkując deformacją szyku.

Uzyskane informacje pozwoliły na opracowanie w rozdziale 4. autorskiego algorytmu synchronicznego sterowania grupą robotów o strukturze rozproszonej. W opracowaniu Doktorant przyjął dwuwarstwową ideę sterowania. Warstwa zewnętrzna służy do realizacji ruchu grupy robotów i utrzymania zadeklarowanej formacji. W tym celu Autor zastosował założenia algorytmu Wirtualnej Struktury i Consensus Tracking, który został rozbudowany o synchronizację czasową sygnałów. Warstwa wewnętrzna algorytmu ma za zadanie realizację ruchu nadążnego pojedynczego robota, w postaci śledzenia trajektorii wzorcowej. Do tego zadania wykorzystano kontroler kinematyczno-dynamiczny z adaptacją parametrów modelu.

W celu potwierdzenia poprawności opracowanego algorytmu sterowania Doktorant w rozdziale 5. zawarł przeprowadzone w środowisku MATLAB/Simulink badania symulacyjne. Badania zrealizowano w dwóch etapach.

Etap pierwszy (rozdział 5.1 i 5.2) obejmował analizę komputerową warstwy wewnętrznej algorytmu sterowania przeprowadzoną dla trzech konfiguracji systemu sterowania: śledzenie trajektorii za pomocą kontrolera kinematycznego, kinematyczno-dynamicznego oraz kinematyczno-dynamicznego z adaptacją. W pracy Doktorant zawarł wyniki analiz dla trzech realizowanych przez pojedynczy robot trajektorii testowych, przy dwóch postawionych kryteriach ruchu (przez określony czas i ruchu po skończonej drodze), które wykazały stabilność i dokładność systemu sterowania.

Przeprowadzone analizy komputerowe wykazały, że aby uzyskać dużą dokładność śledzenia w przypadku bardziej skomplikowanych trajektorii konieczne jest uwzględnienie kontrolera kinematyczno-dynamicznego. Zastosowanie trzeciej konfiguracji systemu sterowania pozwoliło na zredukowanie błędów śledzenia trajektorii i prędkości wzorcowej w stosunku do konfiguracji pierwszej o minimum 50%.

W etapie drugim (rozdział 5.3 i 5.4) Doktorant przeprowadził badania symulacyjne warstwy zewnętrznej, odpowiedzialnej za synchronizację i utrzymanie zadanej formacji grupy robotów (przy uwzględnieniu konfiguracji systemu sterowania pojedynczego robota w postaci kontrolera kinematyczno-dynamicznego z adaptacją, który wykazał najlepsze rezultaty sterowania). W przeprowadzonych badaniach Autor wykazał odporność algorytmu sterowania na opóźnienia czasowe sygnałów sterujących i zakłócenia wynikające z niesprawności robotów wchodzących w skład

grupy. Tym samym w rozdziale wykazano poprawność działania stworzonego przez Doktoranta algorytmu realizującego zadanie śledzenia trajektorii grupy robotów z zachowaniem ustalonego kształtu formacji.

Część badawczą pracy zamyka rozdział 6, w którym Doktorant zaimplementował opracowany przez siebie algorytm sterowania na rzeczywistych robotach TURTLEBOT 2. Analizowany system sterowania opracowany został w języku C++, z wykorzystaniem platformy Robot Operating System (ROS), z którą współpracują te roboty. Autor, analizując wyznaczone w badaniach doświadczalnych uchyby położenia, orientacji, prędkości i odległości pomiędzy robotami, potwierdził ich zgodność z wynikami uzyskanymi drogą symulacji numerycznych, co udowadnia prawidłowość opracowania autorskiego algorytmu sterowania. Na podstawie przeprowadzonych badań porównawczych Doktorant potwierdził też tezę, iż optymalną konfiguracją warstwy wewnętrznej algorytmu sterowania jest zastosowanie kontrolera kinematyczno-dynamicznego z adaptacją. Zastosowanie synchronizacji czasowej sygnałów sterujących pozwoliło na znaczne zmniejszenie błędów odległości pomiędzy robotami w czasie startu i ruchu, a w efekcie dokładniejsze zachowanie zadanej formacji grupy.

Na zakończenie pracy Doktorant przeanalizował pokrótce zakres przeprowadzonych badań i analiz, przedstawiając przy okazji wnioski wynikające z opisanych w rozprawie rozważań oraz podkreślając rangę uzyskanych wyników i oryginalność treści.

Zawarty w pracy wykaz literatury obejmuje 132 uporządkowane alfabetycznie pozycje bibliograficzne w języku polskim i angielskim, w tym 11 współautorstwa Doktoranta. Źródła literaturowe zostały dobrane i wykorzystane w tekście rozprawy właściwie, z dużą starannością. Jedyne zauważone mankamentem są powielane w dwóch miejscach w spisie literatury te same pozycje: [5] i [6], [16] i [17].

Reasumując, praca stanowi logiczną, spójną całość dobrze zredagowaną zarówno pod względem merytorycznym, jak i edytorskim oraz językowym. Używana w pracy nomenklatura jest prawidłowa. Zakres wykonanych przez Autora badań i analiz w pełni potwierdza zrealizowanie celu pracy. Proporcje tematyczne treści kolejnych rozdziałów są właściwe i stanowią logiczną całość. Dysertacja została przygotowana w sposób estetyczny.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Problematyka podjęta w rozprawie doktorskiej mgr inż. Michała Siwka jest niezmiernie aktualna i perspektywiczna. Zastosowanie robotów mobilnych jako systemów transportowych jest wyraźnym trendem, obserwowanym w obszarze automatyki przemysłowej i robotyzacji procesów produkcyjnych. Coraz częściej, w celu wykonania skomplikowanego zadania transportowego, roboty integrowane są w grupy co rodzi problemy związane z ich wzajemną komunikacją, nawigacją oraz synchronizacją przy sterowaniu autonomicznym.

Nowatorstwo zaproponowanej przez mgr inż. Michała Siwka metodyki badawczej polega na połączeniu zagadnień modelowania matematycznego grupy robotów z uwzględnieniem więzów reonomicznych oraz opóźnień określonych na podstawie badań doświadczalnych. W ten sposób osiągnięty został cel badań, w postaci opracowanego algorytmu synchronicznego sterowania grupą robotów mobilnych o strukturze rozproszonej, z uwzględnieniem minimalizacji uchybu jako funkcji celu.

Realizacja pracy wymagała od Doktoranta szerokiej i ugruntowanej wiedzy łączącej zakres robotyki, teorii sterowania, identyfikacji parametrycznej oraz modelowania złożonych układów fizycznych, a także biegłego posługiwania się użytymi środowiskami programistycznymi, takimi jak MSC Adams, MATLAB/Simulink, oraz języki C, C++.

Na podkreślenie zasługują następujące walory naukowe rozprawy:

- Opracowanie modelu dynamiki pojedynczego robota wykorzystujące autorskie podejście polegające na połączeniu metody identyfikacji parametrycznej offline i online, w celu minimalizacji błędu identyfikacji, czego zwieńczeniem była przeprowadzona w pracy analiza wrażliwości wykazująca wpływ poszczególnych parametrów modelu na uchyby sterowania.
- Opracowanie autorskiego algorytmu synchronicznego sterowania grupą robotów o strukturze rozproszonej, który wykorzystuje dwuwarstwową ideę sterowania łączącą sterowanie określoną formacją robotów z realizacją ruchu nadszeregowego pojedynczego robota.
- Opracowanie modelu matematycznego grupy robotów o strukturze rozproszonej uwzględniającego opóźnienia czasowe sygnałów sterujących.

- Eksperymentalne badania charakteru i wartości opóźnień czasowych występujących w transmisji sygnałów sterujących pomiędzy robotami tworzącymi grupę o strukturze rozproszonej.
- Sprawdzenie za pomocą symulacji numerycznych wpływu opóźnień czasowych sygnałów sterujących na ruch grupy robotów oraz na ich wzajemną interakcję.
- Opracowanie autorskiego algorytmu sterowania grupą robotów o strukturze rozproszonej uwzględniającego synchronizację czasową jednostek.
- Weryfikacja poprawności opracowanego autorskiego algorytmu sterowania za pomocą badań symulacyjnych (w środowisku MATLAB/Simulink) i laboratoryjnych (z wykorzystaniem platformy ROS i języka C++).

Podsumowując stwierdzam z całą stanowczością, że zagadnienie naukowe, którego rozwiązania podjął się Doktorant zostało zbadane wszechstronnie i wnikliwie. Cel pracy został osiągnięty. Analizy wyników teoretycznych, symulacyjnych i doświadczalnych zostały przeprowadzone z należytą starannością, a sformułowane wnioski są prawidłowe. Tym samym uważam że przedłożona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Michała Siwka spełnia wymogi merytoryczne, formalne i redakcyjne oraz zawiera wyraźne elementy nowości naukowej oraz innowacyjności.

Należy podkreślić, że:

- zagadnienie naukowe zostało jasno sformułowane i rozwiązane, a cel naukowy został osiągnięty;
- rozprawa ma charakter teoretyczno-doświadczalny;
- rozprawę można zaliczyć do dyscypliny inżynieria mechaniczna;
- temat rozprawy jest aktualny i perspektywiczny
- Doktorant wykazał się wysokim poziomem wiedzy we wspomnianej dyscyplinie oraz wykazał umiejętność i cechy do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Dodatkowym walorem rozprawy jest to, iż treści w niej zawarte zostały już w dużej mierze poddane publicznej ocenie zarówno przez uczestników 4 konferencji naukowych (krajowych i zagranicznych), na których Doktorant wygłaszał referaty jak również przez recenzentów czasopism, w których opublikował 7 artykułów (4 artykuły w czasopismach z listy MEiN oraz 3 artykuły w materiałach konferencyjnych indeksowanych w bazie WOS). Dorobek publikacyjny Doktoranta związany z realizacją pracy niewątpliwie zasługuje na wyróżnienie.

W czasie lektury rozprawy nasunęły mi się następujące komentarze, pytania i uwagi:

1. Układ pracy jest przejrzysty. Doktorant wyraża myśli w sposób jasny i zrozumiały.
2. Zdążają się błędy stylistyczne, językowe i tzw. literówki. Łącznie naliczyłam ich w pracy kilkadziesiąt.
3. Zamiast zwrotu „w tabeli poniżej” , „powyższe równania” powinno się stosować odnośniki numeracyjne dokładnie określające o którą tabelę, czy równanie chodzi.
4. Autor nie unika zwrotów potocznych, np. „bryła sztywna o znanej bezwładności”, „prędkościowe ograniczenia ruchu”, „układ statyczny”.
5. W spisie literatury w dwóch miejscach powielane są te same pozycje: [5] i [6], [16] i [17]
6. Duża część rysunków zamieszczonych w pracy jest słabej rozdzielczości i dotyczy to zarówno zdjęć zapożyczonych z literatury, jak i opracowań własnych, w tym wyników symulacji numerycznych (tylko w rozdziale 1. naliczyłam 6 takich rysunków, na 11 zamieszczonych – rys. 1.1, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.11).
7. W opisie części rysunków nie zostały umieszczone odwołania do źródeł, z których Autor czerpał dane i informacje (np. rys. 1.4, 1.5, itd.).
8. Str. 21^{3,5} brak odnośników literaturowych do analizowanej treści
9. Wzory (2.5) i (2.6) – czy na pewno są poprawne?
10. Rys. 3.4 błąd w opisie na osi odciętych.
11. Pojęcie nieholonomiczności nie jest tożsame z nałożeniem więzów kinematycznych, jak zostało zasugerowane na str. 30.
12. W modelu kinematycznym (rozdział 2.3.1) Autor definiuje model zastępczy robota, jako model z jednym kołem umieszczonym w środku geometrycznym (s. 42), a następnie (s. 43 i dalej w pracy) piszę, iż zespół napędowy stanowią dwa koła napędzane niezależnie dwoma silnikami prądu stałego. Proszę uzasadnić tą nieścisłość.
13. Rys. 3.19 – skoro wszystkie roboty połączone są z paletą za pomocą przegubów obrotowych, to dlaczego w przegubie 2 nie uwzględniono sił reakcji?
14. Proszę podać interpretację fizyczną równań równowagi (3.3).
15. Dlaczego kąt orientacji wzorcowej jest funkcją pochodnych położenia? (wzór 4.1)
16. Z przeprowadzonych badań wynika, że opracowany system sterowania sprawdza się dla prędkości nie przekraczających 0,4 m/s. Czy analizowano

realizację ruchu robotów osiągających większe prędkości, np., wspomniane w pracy roboty AGV? Proszę o komentarz.

17. Zastosowana metodyka badawcza została ograniczona do grupy trzech robotów. Czy sprawdziłaby się ona dla większej, a przez to bardziej złożonej konfiguracji? Jaki założenia należałoby wtedy podjąć?

Wymienione uwagi nie mają wpływu na ogólną ocenę rozprawy, która niewątpliwie wnosi cenny wkład w analizę procesu modelowania oraz rozwój systemów sterowania robotów mobilnych wymagających wysokiej precyzji pozycjonowania. Doktorant wykazał się nowatorskim podejściem w opracowywaniu algorytmów sterowania grupą robotów mobilnych. Zastosowana metodyka badawcza oraz sposób analizy rozwiązywanych w pracy zadań, zwłaszcza z wykorzystaniem metod numerycznych, świadczą o bardzo dobrym przygotowaniu Doktoranta do prowadzenia samodzielnej pracy naukowo-badawczej.

4. Podsumowanie

Rozprawę doktorską mgr. inż. Michała Siwka oceniam bardzo wysoko. Jest ona opracowaniem oryginalnym i świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu merytorycznym Autora. Wszystkie podejmowane w dysertacji wątki są ważne zarówno w aspekcie teoretycznym, jak i użytkowym. Doktorant wykazał się wiedzą i dojrzałością naukową w formułowaniu zagadnień oraz realizacji rozwiązań. Stanowi to podstawę do stwierdzenia, iż mgr inż. Michał Siwek ma bardzo dobre przygotowanie teoretyczne i warsztatowe do twórczej pracy naukowo-badawczej.

W moim przekonaniu rozprawa doktorska mgr inż. Michała Siwka spełnia wymagania stawiane przez aktualnie obowiązującą Ustawę z dnia 14 marca 2003 roku *o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*. Stawiam wniosek o **przyjęcie rozprawy i dopuszczenie mgr. inż. Michała Siwka do jej publicznej obrony**.

Dodatkowo wnioskuję o wyróżnienie rozprawy za:

- podejmowane w pracy ważne tematy, wnoszące cenny wkład naukowy w rozwój zagadnień sterowania automatycznego grupą robotów mobilnych o strukturze rozproszonej;

- dojrzałość Doktoranta jako badacza zaangażowanego w poszukiwanie narzędzi do znalezienia rozwiązania problemu orbitalnego manewru spotkania;
- interdyscyplinarność przedstawionej tematyki łączącej zakres robotyki, teorii sterowania, identyfikacji parametrycznej oraz modelowania złożonych układów fizycznych;
- duży dorobek publikacyjny związany z realizacją rozprawy (w sumie 7 artykułów naukowych, w tym jeden za 140 pkt. MEiN)

E. Gadyś