

Kielce, dnia 21.06.2023 r.

dr hab. inż. Izabela Krzysztofik, prof. PŚk
Politechnika Świętokrzyska
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
Katedra Mechatroniki i Uzbrojenia

RECENZJA

rozprawy doktorskiej **mgra inż. Michała Siwka**

pt. „Modelowanie ruchu i synchroniczne sterowanie grupą robotów mobilnych o strukturze rozproszonej”

Podstawa wykonania recenzji:

Podstawą niniejszej recenzji jest pismo przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” Wojskowej Akademii Technicznej prof. dr hab. inż. Jerzego Małachowskiego z dnia 4 maja 2023 r. z prośbą o opracowanie recenzji rozprawy mgra inż. Michała Siwka pt. „*Modelowanie ruchu i synchroniczne sterowanie grupą robotów mobilnych o strukturze rozproszonej*”, w związku z powołaniem na recenzenta przez Radę Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” WAT uchwałą nr 32/RDN IM/2023 z dnia 19 kwietnia 2023 r.

1. Sylwetka Doktoranta

Mgr inż. Michał Siwek w 2011 roku rozpoczął studia na Wydziale Mechatroniki Wojskowej Akademii Technicznej, na kierunku mechatronika. W 2014 roku obronił pracę inżynierską dotyczącą opracowania modelu robota mobilnego z systemem wizyjnym i kołami w układzie omnidirectional. Następnie w 2016 roku obronił pracę magisterską pt. „Opracowanie konstrukcji robota mobilnego do inspekcji przewodów kanalizacyjnych” i uzyskał tytuł magistra inżyniera mechatroniki, specjalność automatyka i sterowanie. Po ukończeniu studiów rozpoczął pracę na stanowisku inżyniera w Zespole Mechatroniki Katedry Mechatroniki WML WAT.

W swoim dorobku naukowym Doktorant posiada 22 współautorskie publikacje w czasopiśmie z listy MEiN. Wygłosił osiem referatów na konferencjach krajowych i zagranicznych. Ponadto brał udział w czterech projektach badawczo-rozwojowych.

2. Zakres i charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pt. „*Modelowanie ruchu i synchroniczne sterowanie grupą robotów mobilnych o strukturze rozproszonej*” obejmuje 228 stron, w tym: trzy strony spisu treści, dwie strony wykazu ważniejszych oznaczeń, osiem stron spisu literatury zawierającego 132 pozycje uporządkowane alfabetycznie oraz trzy strony załączników A i B z wyprowadzeniami zależności matematycznych. Rozprawa nie zawiera streszczenia po polsku i po angielsku.

Praca zawiera wstęp, sześć rozdziałów głównych oraz podsumowanie. Praca dotyczy zagadnień związanych ze sterowaniem grupą robotów mobilnych o strukturze rozproszonej. Temat pracy jest aktualny i zgodny z trendem rozwojowym obserwowanym w obszarze automatyki przemysłowej i robotyzacji procesów produkcji. Coraz częściej grupy robotów o strukturze rozproszonej wykorzystywane są w zadaniach transportu ładunków wielkogabarytowych. Podjęcie tematyki rozprawy wynikało z zainteresowań Doktoranta dotyczących algorytmów sterowania grupą robotów i współpracy robotów mobilnych z przemysłowymi a także z potrzeby kontynuacji prowadzonych w katedrze badań naukowych.

Podstawowym celem rozważań Doktoranta była analiza algorytmów sterowania rozproszonymi grupami robotów, analiza błędów wpływających na dokładność śledzenia i pozycjonowania robotów w grupie oraz opracowanie koncepcji synchronicznego sterowania grupą robotów o strukturze rozproszonej. Obiektem badań przyjętym w pracy był robot TURTLEBOT 2. Doktorant dokonał modyfikacji konstrukcji robota, aby wyeliminować efekt kołysania się robota podczas ruchu. Następnie opracował model matematyczny ruchu robota (model kinematyczny i dynamiczny) i dokonał oceny wrażliwości, która wykazała wpływ poszczególnych parametrów modelu dynamicznego na uchyby śledzenia trajektorii i prędkości wzorcowej. Kolejno przeprowadził walidację opracowanego modelu matematycznego polegającą na porównaniu trajektorii otrzymanej w wyniku symulacji i zrealizowanej przez rzeczywistego robota w odpowiedzi na zadane wymuszenie. Pozytywna walidacja pozwoliła na opracowanie modelu teoretycznego grupy robotów złożonej z robotów TURTLEBOT 2. Następnie Doktorant przeprowadził badania rozpoznawcze dokładności pozycjonowania robotów w grupie rozproszonej tj. dwa badania laboratoryjne z wykorzystaniem rzeczywistych robotów oraz dwa badania symulacyjne w środowisku MATLAB/Simulink i MSC Adams. Uzyskane wyniki badań pozwoliły określić charakter, źródło pochodzenia i wartości opóźnień czasowych sygnałów sterujących.

Kolejno Doktorant opracował autorski algorytm synchronicznego sterowania grupą robotów o strukturze rozproszonej, optymalny ze względu na minimalizację uchybu i zaimplementował w środowisku Matlab/Simulink i ROS z wykorzystaniem języka programowania C++. Finalnie, celem sprawdzenia poprawności działania autorskiego algorytmu Doktorant zaplanował i przeprowadził szereg badań symulacyjnych i laboratoryjnych śledzenia trzech różnych trajektorii wzorcowych. Praca ma więc charakter teoretyczno-doświadczalny oraz praktyczne zastosowanie. Opracowany algorytm został przetestowany nie tylko symulacyjne, ale także na rzeczywistych robotach.

Pracę rozpoczyna *Wstęp*, w którym Doktorant krótko podkreślił, że wyraźnym trendem w zakresie robotyzacji procesów transportowych jest zastosowanie grupy współpracujących robotów. Przedstawił motywację podjęcia problematyki sterowania robotami mobilnymi o strukturze rozproszonej oraz sformułował cel pracy, który brzmi: *Opracowanie algorytmu synchronicznego sterowania grupą robotów mobilnych o strukturze rozproszonej*. Do realizacji tak sformułowanego celu Doktorant zaplanował pięć zadań cząstkowych obejmujących: analizę stanu wiedzy dotyczącą algorytmów sterowania grupą robotów mobilnych z uwzględnieniem ich kinematyki i dynamiki, opracowanie koncepcji synchronicznego sterowania grupą robotów, opracowanie modelu teoretycznego grupy robotów, opracowanie algorytmu synchronicznego sterowania grupą robotów o strukturze rozproszonej i ostatecznie weryfikacja symulacyjna i doświadczalna tegoż algorytmu. Postawione zadania realizowane są w kolejnych rozdziałach rozprawy.

Rozdział 1 zawiera analizę dostępnej literatury polskiej i zagranicznej. Doktorant przedstawił podstawowe układy jezdne stosowane w mobilnych robotach przemysłowych oraz struktury sterowania. Dokonał przeglądu algorytmów sterowania grupami robotów mobilnych, analizy kontrolerów stosowanych do realizacji zadania śledzenia trajektorii oraz analizy błędów wpływających na dokładność pozycjonowania robotów w grupie rozproszonej. Rozdział kończy podsumowanie analizy. Z przedstawionego przeglądu wynika, że najczęściej stosowaną jest struktura hierarchiczna systemu. Jednak w przypadku realizacji zadań transportowych wymaga jest wysoka precyzja w określonym czasie. W tym przypadku lepsze rezultaty dają algorytmy sterowania zdecentralizowanego. Ponadto Doktorant zauważył możliwość poprawy parametrów ruchu grupy robotów poprzez zastosowanie synchronizacji czasowej jednostek w systemie sterowania. Przeprowadzona analiza stanu zagadnienia pozwoliła Doktorantowi na sformułowanie celu pracy, stąd uważam, że cel powinien być przedstawiony właśnie po tym rozdziale.



Rozdział 2 obejmuje opis obiektu badań oraz platformy programistycznej ROS (Robot Operating System). Jako obiekt badań Doktorant wybrał grupę robotów TURTLEBOT 2. Roboty te znajdują się na wyposażeniu Laboratorium Zakładu Mechatroniki Instytutu Techniki Rakietowej i Mechatroniki WAT oraz współpracują z systemem Linux i platformą ROS. Doktorant opracował model matematyczny robota: model kinematyczny przekształcony do postaci, gdzie sygnałami sterującymi są prędkość liniowa i kątowa a sygnałami wyjściowymi pozycja i orientacja robota oraz model dynamiczny, w postaci gdzie sygnałami sterującymi i wyjściowymi są prędkości liniowa i kątowa. Kolejno przeprowadził identyfikację nieznanych parametrów modelu dynamicznego w drodze offline i online. Ostatecznie po dokonaniu walidacji modelu matematycznego robota TURTLEBOT 2 przedstawił model teoretyczny grupy robotów o strukturze rozproszonej.

W *Rozdziale 3* przedstawiono wyniki badań rozpoznawczych dokładności pozycjonowania robotów w grupie o strukturze rozproszonej. Celem tych badań było rozpoznanie charakteru i wielkości błędów wywołanych opóźnieniami transmisji danych sterujących. Doktorant przeprowadził dwa badania laboratoryjne z wykorzystaniem rzeczywistych robotów oraz dwa badania symulacyjne w środowisku MATLAB/Simulink i MSC Adams. Rozdział kończy podsumowanie badań. Przeprowadzona analiza wyników badań wykazała, że opóźnienia czasowe (nawet niewielkie rzędu 300-500 ms) mają bardzo znaczący wpływ na czas i dokładność osiągnięcia zadanej pozycji końcowej oraz na wzajemne odległości robotów w trakcie wykonywania zadania. Wielkość błędów uniemożliwia prawidłowe wykonywanie zadań przez grupę robotów. Przeprowadzone badania laboratoryjne wykazały wpływ ilości robotów w grupie i innych urządzeń podłączonych do tej samej sieci na wartość opóźnień czasowych komunikacji pomiędzy robotami. Ponadto wykazano, że pojawienie się przeszkód środowiskowych na drodze transmisji pomiędzy robotami a punktem dostępowym nie jest czynnikiem opóźniającym transmisję.

Rozdziały 4, 5 i 6 obejmują kluczową część rozprawy. Zawierają opis autorskiego algorytmu synchronicznego sterowania grupą robotów o strukturze rozproszonej oraz wyniki szeregu badań symulacyjnych i doświadczalnych.

W *Rozdziale 4* przedstawiono autorski algorytm sterowania grupą robotów o strukturze rozproszonej. Doktorant zaproponował algorytm sterowania dwuwarstwowego. Warstwa zewnętrzna odpowiada za utrzymanie wymaganej formacji grupy. Do tego zadania wykorzystano założenia algorytmu Wirtualnej Struktury i algorytmu Konsensusu, który rozbudowano o synchronizację czasową sygnałów. Warstwa wewnętrzna algorytmu odpowiada

za sterowanie pojedynczym robotem realizując zadanie śledzenia trajektorii wzorcowej. W tym celu wykorzystano kontroler kinematyczno-dynamiczny z adaptacją parametrów modelu.

Rozdział 5 zawiera wyniki badań numerycznych algorytmu synchronicznego sterowania grupa robotów o strukturze rozproszonej prowadzonych w środowisku Matlab/Simulink. Badania podzielono na dwa etapy: badania symulacyjne śledzenia trajektorii wzorcowych przez jednego robota, co jest realizowane przez warstwę wewnętrzną algorytmu oraz badania symulacyjne warstwy zewnętrznej algorytmu sterowania, która odpowiada za synchronizację i utrzymanie zadanej formacji grupy robotów. Badania rozpoczęto od sprawdzenia warstwy wewnętrznej i prowadzono dla następujących trzech konfiguracji układu sterowania:

- a) śledzenia trajektorii za pomocą kontrolera kinematycznego,
- b) śledzenia trajektorii za pomocą kontrolera kinematyczno-dynamicznego (połączenia kontrolera kinematycznego i dynamicznego),
- c) śledzenia trajektorii za pomocą kontrolera kinematyczno-dynamicznego z adaptacją.

Dla każdej z powyższych konfiguracji badania przeprowadzono według kryterium ruchu przez określony czas oraz kryterium ruchu po skończonej drodze. Jako trajektorie wzorcowe generowano trajektorię kołową, sinusoidalną i w postaci cyfry osiem. Wyniki badań przedstawiono na następujących wykresach:

- porównanie trajektorii wzorcowej i otrzymanej z badań symulacyjnych,
- przebieg sygnałów sterujących: prędkość liniowa i kątowa,
- uchyby śledzenia: pozycji e_x, e_y i orientacji e_θ oraz
- uchyby prędkości: liniowej e_v i kątowej e_ω .

Badania warstwy wewnętrznej Doktorant kończy podsumowaniem, z którego wynika, że optymalnym rozwiązaniem pod względem minimalnego uchybu i czasu regulacji jest kontroler kinematyczno-dynamiczny z adaptacją, czyli połączenie kontrolera kinematycznego i dynamicznego z adaptacją.

Następnie Doktorant przeprowadził badania warstwy zewnętrznej w celu sprawdzenia odporności algorytmu sterowania na opóźnienia czasowe sygnałów sterujących i zakłócenia wynikające z niesprawności robotów wchodzących w skład grupy. W badaniach tych zastosowano wyłącznie konfigurację układu sterowania warstwy wewnętrznej obejmującą kontroler kinematyczno-dynamiczny z adaptacją. W pierwszej kolejności przeprowadzono badania bez uwzględnienia kontrolera grupy a następnie dla kompletnej konfiguracji algorytmu sterowania. W badaniach rozpatrywano dwa warianty:

- a) synchronizacja rozpoczęcia ruchu przez grupę,

b) synchroniczny ruch grupy po zadanej trajektorii.

Wyniki badań przedstawiono na następujących wykresach:

- trajektorie robotów uzyskane z badań symulacyjnych,
- uchyby śledzenia trajektorii wzorcowych,
- błędy odległości pomiędzy robotami oraz
- prędkości liniowe.

Badania warstwy zewnętrznej Doktorant również kończy podsumowaniem, z którego wynika, że zaproponowany autorski algorytm sterowania grupą robotów działa prawidłowo.

Rozdział piąty kończy całościowe podsumowanie badań symulacyjnych.

Rozdział 6 dotyczy badań doświadczalnych opracowanego algorytmu sterowania grupą robotów. Badania symulacyjne wykazały poprawność działania algorytmu realizującego zadanie śledzenia trajektorii, więc w kolejnym kroku realizacji pracy Doktorant zaimplementował algorytm na rzeczywistych robotach TURTLEBOT 2 i przeprowadził badania doświadczalne w laboratorium Instytutu Techniki Raketowej i Mechatroniki WML WAT. System sterowania opracowano z wykorzystaniem platformy Robot Operating System (ROS), z którą współpracują wspomniane roboty, przy użyciu języka programowania C++. Badania doświadczalne również podzielono na dwa etapy: badania śledzenia trajektorii wzorcowych przez jednego robota, co jest realizowane przez warstwę wewnętrzną algorytmu oraz badania warstwy zewnętrznej algorytmu sterowania, która odpowiada za synchronizację i utrzymanie zadanej formacji grupy robotów. W celu potwierdzenia wyników uzyskanych w badaniach symulacyjnych, zakres i metodyka badań, nastawy kontrolerów i warunki początkowe w badaniach laboratoryjnych przyjęto takie same jak w badaniach symulacyjnych. Również wyniki badań przedstawiono na takich samych wykresach jak w badaniach symulacyjnych. Badania warstwy wewnętrznej kończy podsumowanie, w którym Doktorant zawarł stwierdzenie, że optymalną konfiguracją tej warstwy algorytmu sterowania jest zastosowanie kontrolera kinematyczno-dynamicznego z adaptacją.

Kolejno Doktorant przeprowadził badania doświadczalne warstwy zewnętrznej algorytmu sterowania. W badaniach warstwy zewnętrznej przyjęto warunki początkowe i nastawy kontrolerów takie jak w badaniach symulacyjnych. Zastosowano konfigurację układu sterowania warstwy wewnętrznej obejmującą połączenie kontrolera kinematycznego i dynamicznego z adaptacją. W pierwszej kolejności przeprowadzono badania bez uwzględnienia warstwy wewnętrznej czyli kontrolera grupy a następnie dla kompletnej konfiguracji algorytmu sterowania. Analogicznie do badań symulacyjnych odporność

algorytmu sterowania na opóźnienia czasowe zbadano na podstawie synchronizacji rozpoczęcia ruchu grupy trzech robotów po linii prostej. Z kolei odporność algorytmu na zakłócenia wynikające z niesprawności robotów wchodzących w skład grupy sprawdzono w badaniu synchronicznego ruchu po trajektorii kołowej. Wyniki badań przedstawiono na wykresach przyjętych jak w badaniach symulacyjnych. Badania warstwy zewnętrznej kończą się podsumowaniem, w którym Doktorant stwierdza, że zaproponowany autorski algorytm sterowania grupa robotów działa prawidłowo.

Rozdział szósty również kończy całościowe podsumowanie badań doświadczalnych.

Doktorant przeprowadził wiele badań numerycznych i doświadczalnych opracowanego algorytmu sterowania grupą robotów o strukturze rozproszonej. Każdy wariant przeprowadzonych badań podsumowuje rzeczowymi wnioskami. Również rozdziały 1,3, 5 i 6, zakończone są podsumowaniem przeprowadzonych analiz, badań symulacyjnych i doświadczalnych. Uważam ten sposób prezentowania wyników własnych badań za właściwy i oceniam go wysoko.

Rozprawę kończy *Podsumowanie i wnioski końcowe oraz spis literatury*.

Najważniejszym wnioskiem wypływającym z realizacji pracy jest to, że opracowany autorski algorytm synchronicznego sterowania grupą robotów mobilnych o strukturze rozproszonej, z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody Consensus Tracking realizuje synchroniczny ruch grupy z zachowaniem zadanego kształtu formacji nawet w przypadku występowania błędów w komunikacji pomiędzy robotami. Zarówno badania symulacyjne jak i doświadczalne wykazały, że zastosowanie synchronizacji czasowej sygnałów sterujących pozwoliło na zmniejszenie błędów odległości pomiędzy robotami, wywołanych opóźnieniami czasowymi oraz zakłóceniami. Istotne jest, że wyznaczone w badaniach doświadczalnych wartości uchybów są dopuszczalne z punktu widzenia zastosowania grupy robotów do zadań transportowych. Opracowany przez Doktoranta algorytm sterowania pozwala na łatwą adaptację do dostępnych na rynku robotów AGV.

Wykaz literatury obejmuje 132 pozycję, w tym 11 pozycji współautorskich Doktoranta.

3. Ogólna ocena rozprawy

Rozprawa doktorska pt. „*Modelowanie ruchu i synchroniczne sterowanie grupą robotów mobilnych o strukturze rozproszonej*” koncertuje się wokół problemów związanych ze sterowaniem grupą robotów mobilnych o strukturze rozproszonej. Doktorant podjął się trudnego zadania opracowania algorytmu synchronicznego sterowania grupą robotów mobilnych o strukturze rozproszonej.

Układ i struktura rozprawy są poprawne. Doktorant dokonał przeglądu literatury i sformułował cel pracy. Praca zawiera część teoretyczną opisującą obiekt badań i model teoretyczny grupy robotów oraz część praktyczną, w której przedstawiono wyniki badań numerycznych i doświadczalnych. Wyniki pracy prezentowane są w sposób przejrzysty, w graficznej postaci. Rozprawę kończy podsumowanie rozprawy, w tym wnioski końcowe oraz kierunki dalszych badań.

Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć:

- zidentyfikowanie nieznanymi parametrów modelu dynamicznego robota, w drodze identyfikacji parametrycznej online metodą RLS połączonej z metodą offline;
- opracowanie modelu teoretycznego grupy robotów o strukturze rozproszonej uwzględniającego opóźnienia czasowe sygnałów sterujących;
- opracowanie autorskiego algorytmu sterowania grupą robotów o strukturze rozproszonej uwzględniającego synchronizację czasową jednostek;
- implementacja opracowanego algorytmu w środowisku MATLAB/Simulink i ROS z wykorzystaniem języka programowania C++.

Doktorant wykazał się wiedzą z zakresu struktur i algorytmów sterowania grupą robotów, modelowania ruchu robota mobilnego, programowania oraz opracowania wyników badań. Przeprowadzone przez Doktoranta badania symulacyjne i doświadczalne potwierdziły prawidłowe działanie opracowanego algorytmu synchronicznego sterowania grupą robotów o strukturze rozproszonej, co było celem naukowym pracy. Należy podkreślić, że przedstawione w pracy wyniki badań wymagały sporego nakładu pracy i czasu a zagadnienie rozwiązane w pracy ma zastosowanie praktyczne.

Podsumowując, całość rozprawy oceniam wysoko.

Uwagi szczegółowe

Do najważniejszych uwag szczegółowych zaliczam następujące:

1. Rozprawa zredagowana jest starannie. Układ i opracowanie graficzne są dobre. Rysunki i wykresy powinny być lepszej jakości.
2. Występują nieliczne błędy stylistyczne np. str. 54 „Następnie trajektorię otrzymaną w wynik symulacji”; powinno być „ w wyniku”.

3. Przy niektórych rysunkach brak powołania na pozycje literatury. Czy były opracowane przez Doktoranta?
4. Co oznacza P we wzorze 1.2 i ψ we wzorze 2.32?
5. Rys. 2.5 – bezpośrednio pod rysunkiem należało umieścić objaśnienia oznaczeń użytych na rysunku.
6. Nazwy funkcji numerycznych powinny być ujednolicone – patrz wzór 4.1 i 5.1.
7. W jaki sposób zidentyfikowano błąd odczytu położenia kąтового robota TURTLEBOT 2?
8. Zależności 2.5 do 2.9 zawierają błędy. Z zależności 2.5 nie wynika 2.8.
9. Zależność 2.15 zawiera błędy.
10. W jaki sposób otrzymano trajektorię wzorcową (z przejazdu rzeczywistego robota) pokazaną na rys. 2.9? Jakie czujniki były użyte? Czy dokonano filtracji otrzymanych sygnałów?
11. Uchyby pokazane w tabeli 9 nie odpowiadają uchybom przedstawionym na rys. 2.10.
12. Jaka liczba pomiarów przyjęta była do realizacji badań przedstawionych w podrozdziale 3.1.2?
13. Doktorant na str. 69 przedstawił dwa scenariusze. Jednak opóźnienie na sygnał sterujący nakładano w obydwu scenariuszach przed rozpoczęciem ruchu. Czym zatem uzasadnić te dwa scenariusze?
14. Czy Doktorant próbował zastosować inny kontroler niż proporcjonalny?
15. Ile wynosiły wartości parametrów ruchu dla trajektorii „ósemka”?
16. W jaki sposób wyznaczono wartości wzmocnień przedstawione worem 5.4?
17. Czy prowadzone były badania warstwy zewnętrznej $W1$ dla innych trajektorii wzorcowych niż kołowa?
18. W jaki sposób uzyskiwano trajektorie rzeczywiste w badaniach laboratoryjnych? Jakie czujniki użyto? Czy sygnały pomiarowe poddawane były filtracji?
19. Z czego wynikają odchylenia pokazane na wykresach 6.7 i 6.8 pojawiające się między 80 a 100 s.

Powyższe uwagi nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy. Praca ma charakter teoretyczno-doświadczalny oraz potencjał praktyczny. Doktorant wykazał się wiedzą z zakresu metod sterowania, modelowania, programowania oraz prowadzenia badań symulacyjnych i doświadczalnych. Podjął się rozwiązania aktualnego problemu badawczego, a sformułowany cel pracy został osiągnięty.

4. Ocena końcowa rozprawy

Przedstawioną do recenzji rozprawę doktorską mgr. inż. Michała Siwka oceniam wysoko. Podjęty problem jest istotny i dotyczy precyzyjnego, synchronicznego sterowania grupą robotów o strukturze rozproszonej. Sformułowany cel pracy został osiągnięty. Analiza wyników badań symulacyjnych i doświadczalnych została przeprowadzona prawidłowo. Praca świadczy o dobrym przygotowaniu merytorycznym Autora. Doktorant wykazał się odpowiednią wiedzą i umiejętnościami prowadzenia badań naukowych i interpretacji wyników. Problematyka rozprawy mieści się w dyscyplinie *inżynieria mechaniczna*.

Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Siwka pt. „*Modelowanie ruchu i synchroniczne sterowanie grupą robotów mobilnych o strukturze rozproszonej*” spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez aktualnie obowiązującą Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i **wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony**.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jacek Duganowski', is written in a cursive style.