

dr hab. inż. Andrzej Klepka prof. AGH  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki  
Katedra Robotyki i Mechatroniki

Kraków 13.11.2021

## Recenzja

rozprawy doktorskiej mgra inż. Pawła Penara

pt. *Zastosowanie teorii gier różniczkowych w optymalnym sterowaniu adaptacyjnym ruchem mobilnego robota kołowego*

Recenzja pracy doktorskiej została wykonana na wniosek Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej, pismo RM-530-15-02/16/2021, do którego dołączono egzemplarz rozprawy.

### 1. Wybór tematyki pracy doktorskiej

Tematyka rozprawy doktorskiej mgra inż. Pawła Penara dotyczy ważnych zagadnień z punktu widzenia robotyki. Obejmuje swym zakresem obszary teorii sterowania, kinematyki oraz dynamiki mobilnych robotów kołowych. Praca jest kontynuacją i uzupełnieniem szeregu prac prowadzonych przez zespół badawczy na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. W aspekcie naukowym i badawczym przedstawiony problem jest ważny i aktualny, a jego rozwiązanie może mieć istotny wpływ na poprawę jakości sterowania oraz podniesienie poziomu aplikacyjności nie tylko mobilnych robotów kołowych ale również wszelkich urządzeń wykorzystujących adaptacyjne algorytmy sterowania. Podjęcie tej tematyki w zakresie zawartym w rozprawie wymaga znajomości co najmniej kilku dziedzin nauki, tj. mechaniki w obszarze sposobów modelowania dynamiki i kinematyki układów z więzami nieholonomicznymi, teorii sterowania w obszarze sterowania optymalnego, matematyki w obszarze rachunku różniczkowego oraz przetwarzania sygnałów w obszarze technik pomiarowych.

Podkreślenia wymaga podjęcie przez autora pracy próby teoretycznego i praktycznego podejścia do przedstawionego problemu. Praca zawiera nie tylko rozważania teoretyczne dotyczące problemów dynamiki i kinematyki robotów oraz syntezy adaptacyjnego sterowania optymalnego z zastosowaniem gry różniczkowej o sumie zerowej. Jej uzupełnieniem są badania weryfikacyjne potwierdzające poprawność przyjętych założeń oraz wskazujące kierunki dalszych prac. Nie wszystkie przedstawione w pracy rozważania są wprowadzanie nowe i konieczne do przedstawienia w rozprawie jednak ich biegła znajomość oraz umiejętność adaptacji do nowych aplikacji jest niezbędna w aspekcie efektu jakim jest opracowanie algorytmu adaptacyjnego sterowania optymalnego oraz jego praktyczna implementacja na obiekcie rzeczywistym.

ur

Z powyższych względów należy więc uznać, że podjęta przez autora tematyka pracy jest z naukowego punktu widzenia uzasadniona, a jej efekty pożądane zarówno w aspekcie poznawczym jak i praktycznym.

## 2. Tytuł, treść i układ rozprawy

Zaproponowany tytuł rozprawy „Zastosowanie teorii gier różniczkowych w optymalnym sterowaniu adaptacyjnym ruchem mobilnego robota kołowego” poprawnie oddaje treści zawarte w pracy. Na jego podstawie można wnioskować jakie narzędzie zostało użyte, do jakiego celu oraz do jakiej klasy obiektów ograniczono rozważania.

Całość rozprawy została przedstawiona na 132 stronach wraz ze streszczeniem w wersji angielskiej. Praca nie zawiera niestety wykazu przejętych skrótów i oznaczeń, co przy tak dużej ilości zmiennych występujących w rozważaniach teoretycznych jest dość uciążliwe dla czytelnika. Bibliografia obejmuje 82 pozycje, przy czym są to prace autorów polskich i zagranicznych w większości wydane po roku 2000.

Treść pracy jest dobrze uzupełniona materiałem graficznym odnoszącym się głównie do wyników badań i analiz wykonanych przez autora. Jest to duże ułatwienie dla czytelnika i pozwala na lepsze i szybsze zrozumienie treści. Niektóre z charakterystyk nie zawierają oznaczenia osi układów odniesienia co może utrudniać interpretację. Użyty w pracy język jest zrozumiały, a przyjęta terminologia w większości poprawna i nie budzi zastrzeżeń, choć w treści doszukać się można kilkunastu literówek.

Rozdział 1 zawiera krótki opis tła pracy gdzie przedstawiono główne zagadnienia, wokół których skupia się tematyka rozprawy. Wykazano na ich ważność z punktu widzenia naukowego i aplikacyjnego. Aplikacyjność gry różniczkowej o sumie zerowej w sterowaniu mobilnym robotem kołowym jest wskazana jako główna motywacja autora do podjęcia tej tematyki badań. W kolejnych częściach rozdziału zdefiniowano tezę pracy zakładającą, że zastosowanie teorii gier różniczkowych umożliwia wyznaczenie i implementację w czasie rzeczywistym sterowania optymalnego ruchem mobilnego robota kołowego w obecności najbardziej niekorzystnego zakłócenia. Ponadto określono metodykę badań oraz streszczono zawartość pracy. Nieprecyzyjnie opisano wkład prowadzonych badań w aktualny stan nauki. Stwierdzono jedynie, że jest to poszerzenie problematyki sterowania optymalnego mobilnych robotów kołowych, bez wskazania na płynące z tych rozważań korzyści.

Rozdział 2 zawiera przegląd aktualnego stanu wiedzy na temat stabilności układów dynamicznych, sieci neuronowych, sterowania optymalnego układów nieliniowych, algorytmu autor-krytyk, struktur dyssypatywnych oraz syntezy regulatorów pozwalających na uzyskanie krzepkości sterowania/stabilności w układach regulacji. Informacje zawarte w rozdziale są podstawą do prowadzenia badań w zakresie sterowania kołowym robotem mobilnym. Zbyt małą uwagę poświęcono aktualnym badaniom nad aplikacją algorytmów opartych o gry różniczkowe w robotyce. Spis literatury zawiera jedynie cztery pozycje odnoszące się do tego rodzaju aplikacji. W literaturze znaleźć można znaczące ilości wyników badań prowadzonych w podobnym obszarze - zastosowania gier różniczkowych w robotyce. Dotyczą one zapobiegania kolizji robotów mobilnych, strategii pościg/unikanie dla robotów mobilnych, dynamicznego omijania przeszkód, wyznaczania nośności manipulatora, a nawet wprost śledzenia trajektorii. Uważam,

że opracowanie dotyczące prac o podobnym charakterze powinno zostać zawarte w rozprawie i opatrzone krytycznym komentarzem w kontekście umiejscowienia pracy autora na tle pozostałych osiągnięć. Pozwoliłoby to lepiej umiejscowić osiągnięcie autora wśród aktualnego stanu wiedzy dotyczącego zagadnień sterowania optymalnego mobilnych robotów kołowych z wykorzystaniem gier różniczkowych.

Rozdział 3 zawiera opis dynamiki i kinematyki mobilnego robota kołowego Pioneer 2-DX. Autor przyjął założenia znane z wielu innych prac, w szczególności zespołu Politechniki Rzeszowskiej gdzie zagadnienia te rozwijane są od lat. Analiza kinematyki opiera się na opisie układu z więzami anholonomicznymi przy założeniu braku poślizgu. Przewidziano dwa scenariusze trajektorii: jazda po prostej oraz po łuku. W przypadku dynamiki do jej opisu posłużono się równaniami Lagrange'a II rodzaju. Model nie uwzględnia samonastawnego koła podporowego. W celu odsprzęgnięcia mnożników wykorzystano formalizm matematyczny bazujący na równaniach Maggiiego. Jest to również znana procedura, wielokrotnie wykorzystywane przy tego rodzaju obiektach. Tytuł podrozdziału 3.3 Identyfikacja parametryczna jest dyskusyjny. Dotyczy bowiem optymalizacji (o czym wspomina sam autor). Podsumowując, rozdział nie zawiera ten zawiera informacje niezbędne do przeprowadzenia badań i analiz dotyczących syntezy adaptacyjnego sterowania optymalnego z zastosowaniem gry różniczkowej o sumie zerowej.

Rozdziały 4 i 5 stanowią najbardziej cenną z punktu widzenia naukowego część pracy. W części dotyczącej syntezy sterowania przedstawiono badania obejmujące zakresem zadanie stabilizacji i sterowania nadążnego dla dwóch założonych wcześniej scenariuszy trajektorii. Wynikiem prowadzonych symulacji są informacje dotyczące przebiegów kąta obrotu, przebiegi sterowania, przebiegi procesu adaptacji wag oraz zmienne sterujące kinematyką. Przedstawiono wyniki dla trzech z pięciu badanych punktów. Dokonano analizy ocen funkcji wartości, które zostały wykorzystane do wyznaczenia sterowania w zmiennych warunkach pracy wynikających z zakłóceń parametrycznych. Na podstawie testów udało się wyznaczyć warunek sterowania typu  $H_\infty$ .

Rozdział 5 dotyczy badań weryfikacyjnych algorytmu na obiekcie rzeczywistym – kołowym robocie mobilnym. Wyznaczone w poprzednich badaniach parametry zostały zaimplementowane w układzie sterowania robota. Przeprowadzono testy według założonych wcześniej scenariuszy. Jako zakłócenie przyjęto chwilowe działanie momentu oporowego powodującego gwałtowny spadek prędkości obrotowej wału silnika. Badania potwierdziły zgodność przyjętego modelu z obiektem rzeczywistym. Świadczą o tym niskie wartości wskaźników sterowania. Kolejne testy pozwoliły na opracowanie charakterystyk błędów nadążania, ocen sterowania i zakłóceń oraz adaptacji wag struktury krytyka. Przedstawione porównania charakterystyk opartych o dane zebrane w trakcie eksperymentu oraz danych symulacyjnych jasno pokazują, że przyjęty model nie jest doskonały. Autor zdaje sobie z tego sprawę i wskazuje potencjalne przyczyny rozbieżności. Pomimo różnic można założyć, że zaproponowane podejście umożliwiło realizację zadań robota w sposób zadowalający.

Rozdział 6 stanowi krótkie podsumowanie oraz kierunki dalszych prac.

Podsumowując, struktura pracy jest poprawna. Badania teoretyczne i symulacje poprzedzają weryfikacje na obiekcie rzeczywistym. Szczegółowo przedstawiono metodykę badań, a wyniki skomentowano przedstawiając wnioski wynikające z dyskusji nad rezultatami badań. Zakres prac teoretycznych (a także

pewna część prac doświadczalnych) dotyczy badań podstawowych natomiast większość prac eksperymentalnych świadczyć może o aplikacyjności rozwiązania. Przyjęty przez autora sposób rozwiązania postawionego problemu naukowego świadczy o jego dojrzałości badawczej.

### 3. Ocena merytoryczna rozprawy

W pracy poruszono ważne z punktu widzenia nauki zagadnienia. Dotyczą one głównie mechaniki oraz teorii sterowania. Na uwagę zasługuje fakt, iż mimo że w większej części praca ma charakter badań podstawowych, pośrednio może zostać wykorzystana w sposób aplikacyjny i zastosowana w praktyce do celów sterowania mobilnych robotów kołowych. Rozprawa przedstawia dwa złożone problemy naukowe: dynamikę i kinematykę robotów mobilnych oraz sterowanie optymalne. Pierwszy z nich jest dobrze znany. Pewien niedosyt budzi przyjęty model matematyczny nie uwzględniający poślizgów oraz pominięcie w rozważaniach trzeciego koła (samonastawnego koła podporowego). Można podejrzewać, że duża część błędów modelowania dynamiki robota wynikać może właśnie z pominięcia zjawisk generowanych przez zjawiska czy elementy nie uwzględnione w modelu (np. zmienne opory toczenia koła nastawnego wynikające ze zmiany podłoża w trakcie jazdy). Wyjaśnienia wymaga również założenie tylko dwóch scenariuszy do badań. Nie budzi zastrzeżeń przyjęcie dwóch trajektorii: prostoliniowej i kołowej, jednak bardzo interesujące wydaje się zagadnienie pokonywania przeszkód w płaszczyźnie ruchu.

Badania dotyczące modeli matematycznych wykazały znajomość przez autora współczesnych narzędzi i technik symulacyjnych. Dodatkowo wyniki prac symulacyjnych zostały w poprawny sposób zweryfikowane i opatrzone krytyczną analizą. Biorąc pod uwagę aspekt naukowy, wartość merytoryczną oraz duże prawdopodobieństwo aplikacji praktycznej algorytmu sterowania, za istotne walory pracy należy uznać:

- Opracowanie oryginalnej koncepcji sterowania optymalnego opartego o teorię gier różniczkowych w aplikacji sterowania ruchem mobilnego robota kołowego.
- Przeprowadzenie szerokiego zakresu badań symulacyjnych mających na celu określenie parametrów oraz sformułowanie sterowania dla mobilnego robota kołowego
- Eksperymentalną weryfikację założeń oraz wyników badań symulacyjnych wraz z rzeczową dyskusją wyników
- Sformułowanie wniosków zarówno o charakterze ogólnym jak i szczegółowym, które wnoszą istotną z punktu widzenia nauki wiedzę poznawczą związaną z aplikacją metod matematycznej teorii sterowania optymalnego do zastosowań w robotyce mobilnej.

## 4. Uwagi krytyczne

Analizując treść rozprawy nasunąć mogą się pewnie uwagi oraz pytania. Są to:

1. W rozdziale 2.2 poruszono problem stabilności. Założono stabilność w sensie Lapunova. Nie odniesiono się jednak do przypadku układów metastabilnych. Czy taka sytuacja może dotyczyć mobilnego robota kołowego. Jeśli tak, jakie będą tego konsekwencje w kontekście opracowanego algorytmu sterowania.
2. Jakie założenia przyjęto względem samonastawnego koła podporowego. Czy ma ono zerowy wpływ na zachowania dynamiczne mobilnego robota kołowego?
3. W jaki sposób przyjęto wartości stałych w Tabeli 4.1 oraz Tabeli 4.5
4. Jaki cel ma mnożenie przez 30 sygnałów gracza (dotyczy Rysunku 4.9c oraz kolejnych prezentujących przebiegi ocen sterowania i zakłóceń). Czy nie można zastosować normalizacji w celu prezentacji wyników?
5. Według jakich kryteriów wyznaczono charakterystykę filtra użytego do filtracji sygnału momentu (Rysunek 5.5). Jak jest uzasadnienie stosowania filtra o tak pochyłej charakterystyce? Użycie filtra typu IIR może powodować nieliniową zmianę fazy sygnału. Czy w tym przypadku istnieje takie niebezpieczeństwo? Jeśli tak to jakie są mogą być tego skutki.
6. W rozdziale 5.2 opisano weryfikację układu z zakłóceniem (momentem oporowym). Jak zachowa się układ w przypadku zakłócenia dodatniego (chwilowym wzrostem momentu napędowego)?

Błędy edytorskie:

- Podrozdział 2.5 ma taką samą nazwę jak podrozdział 2.5.3
- Wzory 2.1 oraz 2.91 są identyczne (dotyczy również 2.2-2.92)
- Strona 47 - ...*stanowi jedno z **zagadnie** robotyki...*
- Rysunek 3.12, 3.13b, 4.13 – brak jednostek na osi pionowej
- Strona 68 - ...*prowadzi do **uzyskanie** wzmocnień...*
- Strona 77 – ....*etap jazdy po łuk.*
- Strona 89 - ...*warunku **sterowani** typu...*
- Strona 104 – brak rysunku 5.17c do którego autor odwołuje się w tekście.
- Strona 106 – tytuł podrozdziału 5.4.1.2 zawiera niepotrzebny skrót.
- Strona 123 – pozycja 8 i 9 jest identyczna

Powyższe uwagi nie wpływają na ocenę merytoryczną pracy doktoranta. W rozprawie poruszono bardzo istotny problem dotyczący wiedzy podstawowej. Wymagało to od autora znajomości wielu zagadnień z obszaru kilku dziedzin nauki. Do realizacji zakresu prac wykorzystano poprawny aparat badawczy z pogranicza mechaniki i teorii sterowania co nadaje badaniom interdyscyplinarny charakter. Wyniki prac przedstawione są prawidłowo a wszystkie wnioski odnoszą się bezpośrednio do rezultatów badań i są sformułowane poprawnie. Postawione powyżej pytania mają charakter dyskusyjny, a ich celem jest wskazanie problemów, których można będzie uniknąć w przyszłych pracach badawczych.

## 5. Wnioski końcowe.

Rozprawa doktorska autorstwa mgra inż. Pawła Penara dotyczy ważnego i aktualnego problemu badawczego w zakresie sterowania mobilnych robotów kołowych. Wyniki prac mogą znaleźć zastosowanie w praktyce co oprócz wartości naukowej stanowi o użytecznym charakterze badań. Praca zawiera istotne z punktu widzenia naukowego wnioski, oparte zarówno o badania symulacyjne jak i eksperymenty weryfikacyjne na obiekcie rzeczywistym.

W mojej opinii, praca doktorska pt. **„Zastosowanie teorii gier różniczkowych w optymalnym sterowaniu adaptacyjnym ruchem mobilnego robota kołowego”** autorstwa mgra inż. Pawła Penara spełnia warunki stawiane względem dysertacji doktorskiej, dla których wymagania określono w ustawie o stopniach i tytułach naukowych (Ustawa z dnia 14 marca 2003 r.).

Rozprawa może być dopuszczona do publicznej obrony i stanowić podstawę do nadania mgr. inż. Pawłowi Penarowi stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

*Audrey Kępa*