

dr hab. inż. Piotr Małka, prof. PK
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki
Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej
Katedra Inżynierii Elektrycznej E-2
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

Kraków, 14.08.2024 r.

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Kołodzieja
pt. „Synteza ruchu mobilnego robota z kołami mecanum”

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Zenon Hendzel

Promotor pomocniczy: dr inż. Paweł Penar

1. Wybór tematu, cel i zakres pracy

Recenzowana praca została napisana w języku polskim i obejmuje zagadnienia związane z badaniami nad syntezą ruchu mobilnego robota z kołami typu mecanum. Praca ma charakter badawczo-naukowy, zawiera eksperymentalne rozwiązanie tezy badawczej, dotyczącej “zastosowania obliczeniowo wydajnych metod sterowania odporne i neuronowego mobilnym robotem z kołami mecanum napędzanego nadmiarowo z dużą dokładnością, pomimo występowania zmiennych warunków pracy robota”.

Celem pracy było opracowanie i zweryfikowanie na obiekcie rzeczywistym metod sterowania, które będą nie tylko skuteczne w realizowaniu zadania sterowania nadążnego, ale również mniej obciążającego obliczeniowo systemy sterujące robotami z kołami Mecanum. Dodatkowo celem pracy jest analiza porównawcza i znalezienie równowagi między zaawansowanymi algorytmami opartymi o sterowanie odporne i neuronowe w stosunku do wymagań obliczeniowych a praktycznych zastosowań robotów przemysłowych, medycznych czy też badawczych.

Niniejsza praca obejmuje swoim zakresem koncepcję i dobór metod badawczych, planowanie i organizację eksperymentu, przedstawienie uzyskanych wyników, ich dyskusję oraz sformułowanie wniosków.

Praca składa się z siedmiu rozdziałów opisujących poszczególne obszary teoretyczne i badacze pracy.

W pierwszym rozdziale pracy autor przeanalizował i scharakteryzował problem naukowy oraz dokonał przeglądu dostępnej literatury. Mgr inż. Maciej Kołodziej w bardzo przejrzysty i uporządkowany sposób ukazał dostępne w publikacjach naukowych zagadnienia dotyczące budowy kół typu Mecanum oraz algorytmów sterowania robotów mobilnych opartych o napęd tymi kołami. Autor nieco szerzej odwołał się również do tematyki związanej z rodzajami i metodami sterowania robotów mobilnych takich jak sterowanie nadążne oparte na płaszczyźnie ślizgowej, sterowanie predykcyjne oparte na modelu MPC oraz sterowanie oparte o sztuczna inteligencje – sieci neuronowe.

Informacje przedstawione w omawianym rozdziale stanowią zwarte i w pełni wystarczające wprowadzenie w obszar badań, również dla osób, które nie posiadają doświadczenia w tym zakresie. Można więc stwierdzić, iż rozdział ten ma charakter edukacyjny jak i naukowy, podsumowujący dotychczasowe osiągnięcia w dziedzinie sterowania ruchem nadążnym robotów z kołami mecanum. Określona również została motywacja podjęcia rozwiązania przyjętej tematyki pracy jak również celowość podjętego tematu. W rozdziale tym postawiona została również główna teza pracy, metodyka badań oraz wkład do aktualnego stanu nauki.

W drugim rozdziale autor skupił się na podstawach związanych z teorią i fundamentami algorytmów sterowania nadążnego mobilnych robotów z kołami mecanum MRKM. Opisano kluczowe aspekty stabilności dynamicznych systemów nieliniowych wykorzystujących teorię Lapunowa i stosowanych do weryfikacji stabilności mobilnych robotów kołowych. W rozdziale tym autor zawarł także podstawy opisujące idee systemów sterowania o zmiennej strukturze w tym między innymi ruch ślizgowy. Dodatkowo opisano układ sterowania wykorzystujący sieci neuronowe, metodykę i syntezę jego implementacji do sterowania robotem MRKM. Autor w niniejszym rozdziale opisał i scharakteryzował układy nadmiarowe do których zalicza się roboty mobilne cechują się większą ilością układów wykonawczych niż minimalne wymagania do sterowania wszystkimi stopniami swobody. Autor przyjął założenie konieczne do implementacji i realizacji sterowania obiektem nadmiarowym, iż koła jezdne będą miały taką samą moc układów napędzających koła jezdne.

Trzeci rozdział autor poświęcił na szczegółowy opis obiektu badań jakim jest Mobilny Robot Kołowy z kołami Mecanum - MRKM. Przedstawiono opis i charakterystykę robota, podano równania kinematyki i dynamiki konieczne do generowania wszystkich koniecznych sygnałów i wyznaczenia punktu charakterystycznego robota. Autor wykorzystał równania Maggiiego w procesie syntezy algorytmów sterowania, jednocześnie opisał i podał równania oparte o teorię Lagrange'a. Taki wybór dedykowany jest do implementacji aplikacyjnej i autor przedstawił to odpowiednio uzasadniając swój wybór.

Czwarty rozdział pracy mgr inż. Macieja Kołodzieja opisuje wyniki procesu identyfikacji parametrycznej MRKM. Autor prezentuje proces syntezy algorytmu identyfikacji metodą adaptacyjną przeprowadzony na torze ruchu w kształcie pętli wybranego punktu robota. W niniejszym rozdziale autor pracy zastosował identyfikację parametryczną wykonaną metodą wsadową do której dane pozyskał z eksperymentów pomiarowych jakie wykonał. Dodatkowo przeprowadził walidację oszacowanych parametrów modelu matematycznego wraz z dokonaniem i wyciągnięciem ciekawych i bardzo odkrywczych wniosków, zwłaszcza w zakresie informacji na temat dynamiki modelu matematycznego. Pozyskane dane i oszacowane parametry autor wykorzystuje w dalszym etapie badań.

W rozdziale piątym pracy przedstawiono algorytmy wykorzystywane do sterowania nadążnego robota kołowego z kołami mecanum. Doktorant dokonał syntezy odpornego algorytmu sterowania opierając się zasadach sterowania równoważnego i ślizgowego. Efektywność zaimplementowanego podejścia autor przedstawił poprzez wyniki symulacji oraz analizę i wnioski. Mgr inż. Maciej Kołodziej zidentyfikował, iż sterowanie odporne niweluje błędy wynikające z fazy rozruchu, hamowania oraz realizacji pętli. Błąd statystyczny jest w stanie ustalonym. Kolejnym elementem tego rozdziału jest synteza algorytmu sterowania neuronowego. Dla tego przypadku doktorant dokonał szereg symulacji i doświadczeń wraz z zaprezentowaniem wyników i wniosków eksperymentów. Do najciekawszych zaliczyć można, że odporność algorytmu potwierdza poprawność przyjętych założeń. Testy symulacyjne potwierdziły odporność zaproponowanego algorytmu sterowania na niedokładności parametryczne jakie pojawiły się w obiekcie rzeczywistym.

Rozdział szósty opisuje weryfikację zaproponowanych przez autora algorytmów sterowania jako kluczowego elementu oceny efektywności i niezawodności sterowania robota mobilnego z kołami typu mecanum MRKM. Mgr inż. Maciej Kołodziej szczegółowo opisał i przedstawił stanowisko szybkiego prototypowania oraz systemy pomiarowe wykorzystane do realizacji eksperymentu weryfikacyjnego w trybie on-line. Doktorant przybliżył badania eksperymentalne, wykonane w celu sprawdzenia poprawności opisywanych wcześniej symulacji. W rozdziale przedstawiono wyniki badań weryfikujących algorytmy nadążne wykonane z wykorzystaniem robota mobilnego Husarion Panther wyposażonego w koła typu mecanum. Wykonane symulacje i uzyskane wyniki wskazują, że bardzo dobrze dobrano i oszacowano model matematyczny MRKM. Przeprowadzone symulacje dla sterowanie odporne i neuronowe wskazują bardzo wysoką wydajność tych algorytmów i wskazują na bardzo dobre oszacowanie i przyjęcie przez autora wszystkich założeń i modelu. W przypadku sterowania wykorzystującego sieci neuronowe i zastosowania algorytmu RVFL autor

udowodnił i potwierdził, że algorytm wymaga jedynie podstawowej wiedzy o obiekcie. Takie rozwiązanie pozwala na przeprowadzenie szybkiego prototypowania i weryfikacji algorytmów sterowania nadążnego. W rozdziale udowodniono, że zastosowanie sztucznej inteligencji jakimi są sieci neuronowe znacząco przyspieszają budowę systemów sterowania i szybkiego prototypowania. Algorytmy sterowania odporne, które oparte są o wiedzę i parametry pozyskane z modelu obiektu wymagają o wiele więcej czasu i zasobów w stosunku do Sztucznej Inteligencji.

Siódmy rozdział stanowi podsumowanie zagadnień przedstawionych w recenzowanej pracy. Potwierdza on tezę postawioną we wstępie pracy. Autor potwierdził prawidłowość przyjętych założeń wraz z przeprowadzeniem stosownych symulacji i weryfikacji modelu matematycznego. Najistotniejszym elementem było zweryfikowanie przyjętego modelu i założeń na obiekcie rzeczywistym. Dzięki zbudowanemu stanowisku szybkiego prototypowania doktorant dokonał stosownych symulacji i weryfikacji w trybie on-line. Wszystkie założenia postawione w tezie zostały potwierdzone i zweryfikowane.

Rozdział ten zawiera również kierunki możliwych do przeprowadzenia dalszych prac badawczych, dotyczących zarówno rozwoju zaprezentowanych eksperymentów, jak również wykorzystania nowoczesnych inteligentnych metod sterowania. Dalsze prace przede wszystkim skupiać się będą na optymalizacji istniejących algorytmów, aby jeszcze bardziej zwiększyć ich efektywność i odporność na występujące zakłócenia parametryczne i nieparametryczne. Dodatkowo autor w dalszych pracach chciałby zbadać wydajność proponowanych algorytmów w różnych systemach operacyjnych. Bardzo ciekawą propozycją jest zintegrowanie robota z nowymi sensorami i systemami pomiarowymi takimi jak LIDAR, kamery 3D czy też systemy identyfikujące i rozpoznawcze. Przyczynić się to może do budowy dokładnych map otoczenia co przełoży się na możliwość dokładnego i prawidłowego tworzenia tras i trajektorii robota MRKM, zwłaszcza w dynamicznie zmieniających się warunkach.

Nowatorstwo i oryginalność pracy można upatrywać w zagadnieniach związanych z wykorzystaniem nowoczesny systemów sterowania opartych o sztuczną inteligencję. Najistotniejszym elementem pracy jest rzeczywista weryfikacja przyjętych metod i rozwiązań z wykorzystaniem robota mobilnego Husarion Panther wyposażonego w koła typu mecanum. Taka weryfikacja wnosi do nauki rzeczywiste wnioski i możliwość zaimplementowania rozwiązań w rzeczywistych systemach sterowania robotami i możliwość skomercjalizowania

stworzonego systemu i algorytmu. Dodatkowo Autor pracy opracował i skonstruował własne stanowisko szybkiego prototypowania wykorzystane do weryfikacji on-line MRKM.

2. Poprawność metodyki badań i analiza wyników

W pracy przedstawiono prace projektowe, badania symulacyjne jak i doświadczalne. Udowodniono słuszność zaproponowanego podejścia oraz, co ważne jego praktyczną użyteczność. Zastosowana metodyka badań jest prawidłowa, analiza wyników badań przeprowadzona została w sposób właściwy świadcząc o dużym zasobie wiedzy, inwencji, pracowitości i rzetelności naukowej autora.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Uwagi jakie nasuwają się po przeczytaniu pracy mają charakter **ogólny i redakcyjny**. Zaznaczyć należy, że dysertacja jest bardzo starannie przygotowana i zawiera jedynie kilka różnorodnych usterek redakcyjnych oraz edytorskich. Zarówno te wymienione jak i inne redakcyjne usterki nie umniejszają merytorycznej i naukowej wartości pracy. Poniżej zamieszczono uwagi do recenzowanej pracy:

- 1) Sporadycznie znaleźć można zbędne lub wstawione w błędnym miejscu znaki interpunkcyjne, co może powodować kłopoty w poprawnej interpretacji tekstu.
- 2) Wykresy i rysunki zawarte w pracy, zwłaszcza w rozdziale piątym i szóstym zdecydowanie powinny być większe. Poprawiłoby to czytelność i interpretację otrzymanych wyników jak również estetykę pracy.
- 3) Brak szczegółowego opisu doboru regulatora PD. Dlaczego nie uwzględniono członu I wraz z podaniem dobranych współczynników.
- 4) Brak informacji jak dobrane zostały współczynniki regulatora PD?
- 5) Brak uzasadnienia i weryfikacji wyboru sieci neuronowej typu RVFL, autor powinien wykonać przegląd dostępnych i stosowanych do tego celu typów sieci neuronowych i dokonać wyboru optymalnej, takiej która spełnia najwięcej kryteriów do aproksymacji funkcji nieliniowych opisujących dynamikę MRKM
- 6) Praca mogłaby być wzbogacona dodatkowo o inne metody wykorzystujące sztuczną inteligencję takie jak logika rozmyta czy też algorytmy genetyczne.
- 7) Praca nie zawiera formalnego dowodu stabilności ruchu robota MRKM.

4. Podsumowanie

Omawiana rozprawa zawiera wartościowe wyniki badań i świadczy o tym, że Autor potrafi postawić zagadnienie i rozwiązać je na drodze teoretycznej oraz zweryfikować doświadczalnie, a rezultaty badań zanalizować i wyciągnąć poprawne wnioski. Wywody doktoranta są jasne a wyniki dysertacji mogą być użyteczne z naukowego jak i technicznego punktu widzenia. Na szczególną uwagę zasługuje aplikacyjny charakter pracy.

Biorąc pod uwagę całość pracy należy stwierdzić, iż autor rozwiązał istotny problem nowoczesnej tematyki naukowej w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Kołodzieja spełnia warunki określone w aktualnie obowiązującej ustawie w sprawie warunków i trybu przeprowadzania przewodów doktorskich i może być przedmiotem publicznej obrony.