

Wrocław, dn. 26.08.2024 r.

Dr hab. inż. Krzysztof Jacek Bałchanowski, prof. uczelni
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Układów Mechatronicznych
Wydział Mechaniczny
Politechnika Wrocławska

RECENZJA

pracy doktorskiej

mgr. inż. Macieja Kołodzieja

pt.: "Synteza ruchu mobilnego robota z kołami mecanum"

Promotor: prof. dr hab. inż. Zenon Hendzel

Promotor pomocniczy: dr inż. Paweł Penar

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą opracowania recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Kołodzieja było pismo nr RM-530-01-02/2024 Przewodniczącego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej prof. dr hab. inż. Andrzeja Burghardta w związku z wyznaczeniem mnie na recenzenta uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna.

2. Przedmiot recenzji i ogólna charakterystyka pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska zawiera VII rozdziałów, wykaz 81 pozycji literatury, streszczenia w języku polskim i angielskim na łącznie 150 stronach.

W pracy Doktorant podjął tematykę modelowania ruchu mobilnego robota z kołami Mecanum (MRKM). W szczególności problemy analizy i syntezy sterowania nieholonomicznym nadmiarowym MRKM były tematem jego rozprawy doktorskiej. Roboty z kołami Mecanum mają istotne znaczenie w dzisiejszej technice dzięki swojej niezwyklej manewrowości i wszechstronności. Koła Mecanum, wyposażone w rolki zamontowane pod kątem 45 stopni, umożliwiają robotom poruszanie się w dowolnym kierunku bez konieczności obracania całej maszyny. To daje im przewagę w ciasnych i złożonych przestrzeniach, gdzie precyzja i zwinnosć są kluczowe. W przemyśle te roboty są wykorzystywane do zadań montażowych i transportowych, gdzie wymagane jest dokładne pozycjonowanie. W logistyce ułatwiają one manipulację towarami w magazynach, poprawiając efektywność operacyjną.



W rozdziale I autor zawarł przegląd literatury, sformułował tezę i zakres pracy oraz omówił genezę problemu i przedstawił opis motywacji podjęcia badań naukowych związanych z tematyką niniejszej rozprawy doktorskiej. W pierwszej części przeglądu literatury Autor dokonał krótkiego wprowadzenia do problematyki współczesnej automatyzacji procesów transportowych przy wykorzystaniu omnikierunkowych robotów mobilnych.

Kolejne analizy literaturowe dotyczyły rozważań nad dynamiką modelu robota MRKM. Przytaczając literaturę Doktorant przedstawił przykłady budowy równań dynamiki wykorzystujące klasyczne równanie Lagrange'a II rodzaju, opisał podejście do dynamiki takich robotów oparte na równaniach Chaplygina oraz przytoczył opis dynamiki wynikający z równań Maggiego.

Dokonując dalszej analizy stanu wiedzy Doktorant wskazał, że obecnie w wielu ośrodkach naukowych prowadzone są badania w zakresie budowy teoretycznych algorytmów sterowania robotów z kołami omnikierunkowymi. Przegląd prac pokazał, że badania dotyczące sterowania robotami MRKM realizowane były w obszarach budowy zaawansowanych algorytmów sterowania nadążnego typu: sterowanie predykcyjne oparte na modelu, sterowanie ślizgowe oraz podejście wykorzystujące sieci neuronowe do sterowania. Sterowanie używające podejścia predykcyjnego opartego na modelu z adaptacyjnym dostosowaniem parametrów daje możliwość realizacji złożonych trajektorii i poprawy manewrowości robota. Algorytmy sterowania ślizgowego nieosobliwego i adaptacyjnego wskazują na możliwości zwiększenia dokładności realizacji zadania sterowania nadążnego i odporności na zakłócenia. Złożoność prawa sterowania i konieczność dostrojenia parametrów sterowania tych algorytmów mogą jednak stanowić wyzwania do ich implementacji. Metody sterowania robotami MRKM oparte o sieci neuronowe oparte na teorii stabilności Lapunowa umożliwiają realizację zadania sterowania nadążnego poprzez adaptacyjne sterowanie neuronowe. Tu również złożoność obliczeniowa i luki w walidacji eksperymentalnej mogą ograniczać ich praktyczne wykorzystanie. Doktorant stwierdził, że wszystkie metody wykazują duże możliwości wykorzystania do sterowania MRKM w teoretycznych analizach i symulacjach, lecz wspólną luką w badaniach jest brak pełnej walidacji eksperymentalnej w rzeczywistych warunkach i zastosowaniach.

Doktorant wskazał, że głównym celem tej dysertacji jest opracowanie i zweryfikowanie metod sterowania rzeczywistym robotem MRKM, które będą skuteczne w realizowaniu zadania sterowania nadążnego oraz mniej złożone obliczeniowe. Wykorzystanie opracowanych metod sterowania zwiększy efektywność działania robotów MRKM w czasie rzeczywistym, co znacząco poszerzy ich możliwości aplikacyjne.

Doktorant mając na uwadze stan wiedzy dotyczący sterowania nadążnego oraz widząc braki w implementacji wydajnych obliczeniowo rozwiązań, efektywnych w czasie rzeczywistym sformułował tezę swojej pracy doktorskiej:

„Zastosowanie obliczeniowo wydajnych metod sterowania odpornego i neuronowego mobilnym robotem z kołami mecanum napędzanego nadmiarowo, umożliwiło realizację ruchu nadążnego z dużą dokładnością pomimo występowania zmiennych warunków pracy robota”.

Autor sytuuje swoją pracę doktorską w obrębie mechatroniki w obszarze dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna.

W rozdziałach II - VII Doktorant zawarł naukowe, teoretyczne i doświadczalne, rozwiązanie problemów analizy i syntezy sterowania nieholonomicznym nadmiarowym mobilnym robotem z kołami Mecanum.

W rozdziale II Autor przedstawia podstawowe pojęcia i metody stosowane przy projektowaniu algorytmów sterowania nadążnego. W rozdziale przytaczane są definicje opisujące stabilność liniowych i nieliniowych układów dynamicznych wykorzystujące teorię stabilności Lapunowa. W kolejnej sekcji w tym rozdziale opisane są metody projektowania układów sterowania (sterowanie odporne i adaptacyjne), które nie wymagają dokładnej znajomości modelu obiektu.

Sekcja II.3 w tym rozdziale poświęcona jest algorytmom sterowania neuronowego. Dynamika robotów mobilnych jest trudna do analitycznego opisu i modelowania równaniami matematycznymi. Sieci neuronowe umożliwiają odmienne podejście umożliwiające efektywne sterowanie dla rozmaitych środowisk pracy dzięki swojej zdolności do modelowania skomplikowanych układów i uczenia się z danych. Stanowią użyteczne narzędzi do projektowania złożonych systemów sterowania.

Ostatnia sekcja w rozdziale II dotyczy teorii nadmiarowych układów mechanicznych. Nadmiarowe (redundantne) systemy mechaniczne posiadają więcej układów wykonawczych niż potrzeba do sterowania wszystkimi posiadanymi przez systemem stopniami swobody. Redundancja zapewnia w przypadku awarii jednego układu wykonawczego sprawne działania układu przez zastąpienie uszkodzonego układu nadmiarowym. Zaletami układów nadmiarowych to możliwość wykonywania zadań w różnych warunkach pracy z możliwością adaptacji do zmieniających się wymagań. Wadami układów redundantnych jest konieczność wyznaczania brakujących nadmiarowych sygnałów sterowania oraz ich problematyczność projektowania i sterowania. Autor przedstawił w tej sekcji sposoby wyznaczania brakujących sygnałów przy wykorzystaniu metody alokacji i jej modyfikacji (metody adaptacyjnej i

bezpośredniej alokacji). W niniejszej pracy w realizacji sterowania nadmiarowego przyjęto założenie o równości mocy układów napędzających koła jezdne.

Rozdział III poświęcony jest opisowi obiektu badań w niniejszej pracy, którym jest robot mobilny z kołami Mecanum Husarion Panther. Robot posiada cztery koła napędzane silnikami BLDC80 o nominalnym momencie obrotowy 34,5 Nm, ma udźwig 80 kg i porusza się z prędkością maksymalną 2 m/s. Robot został zmodyfikowany przez producenta w celu uzyskania dostępu do układów wykonawczych z pominięciem wewnętrznego układu sterowania.

W sekcji III.2 Doktorant dokonał opisu kinematyki robota MRKM wyprowadzając równania ruchu po gładkiej płaskiej płaszczyźnie xy . Równania te opisują ruch wybranego punktu S na korpusie robota – położenie, prędkość i przyspieszenie w powiązaniu z kątem obrotu, prędkością kątową i przyspieszeniem kątowym kół MRKM. Przedstawione równania opisują zarówno możliwość ruchu omnikierunkowego wykorzystującego właściwości kół Mecanum przy stałym kącie orientacji korpusu $\beta (\dot{\beta} = 0)$, jak i normalnego ruchu na zwykłych kołach ze zmiennym kątem orientacji korpusu $\beta (\dot{\beta} \neq 0)$.

Sekcja III.3 opisuje zadanie odwrotne kinematyki robota MRKM. Wyprowadzone równania pozwalają dla ruchu punktu S po zadanym torze z zadaną prędkością V_S wyznaczyć kąty obrotu φ_i i prędkości kątowe $\dot{\varphi}_i$ kół. Doktorant w tej sekcji wskazał dwa typy trajektorii, które będzie rozważał przy syntezie i symulacjach sterowania robotem MRKM. Pierwsza wybrana trajektoria to ruch punktu S robota po torze prostoliniowym z zadaną prędkością V_S , drugi tor to ruch punktu S po okręgu o promieni R_R z zadaną prędkością V_S .

W przypadku pierwszej trajektorii został ustalony trapezowy profil prędkości punktu S uwzględniający rozpędzanie do prędkości V_S , ruch ustalony i hamowanie. Robot po trajektorii porusza się ruchem omnikierunkowym z ustalonym kątem $\gamma = 90^\circ$ nachylenia wektora prędkości V_S (ruch względem osi poprzecznej robota). Po dokonaniu aproksymacji wygładzającej profilu prędkości zostały wyznaczone parametry kątowe kół robota – kąty obrotu φ_i , prędkości kątowe $\dot{\varphi}_i$ i przyspieszenia kątowe $\ddot{\varphi}_i$.

Druga przyjęta trajektoria w kształcie pętli została określona w dwóch wariantach. Pierwszy wariant toru był realizowany ruchem omnikierunkowym przy stałym kącie orientacji korpusu $\beta (\dot{\beta} = 0)$, zaś drugi wariant zakładał, że kąt orientacji korpusu β jest zmienny ($\dot{\beta} \neq 0$), czyli układ porusza się jak klasyczny pojazd kołowy. Parametry kątowe kół robota zostały wyznaczone w obu przypadkach toru w kształcie pętli postępowaniem analogicznym jak przy trajektorii po ruchu po prostej.

Ostatnia sekcja rozdziału III zawiera niezbędny opis dynamiki ruchu robota. Stosowanie zaawansowanych algorytmów sterowania robotami mobilnymi wymaga znajomości ich matematycznych modeli dynamiki, obejmujących ich ruch, oddziaływanie z otoczeniem oraz wymuszenia. Doktorant przytacza w tej sekcji równania dynamiki badanego robota MRKM w formie równań Maggieo. Ogólna macierzowa forma równań dynamiki zapisana została w postaci równania (III.56). Równanie to wiąże wektor sygnałów sterowań robota u , z wektorem $F(\omega)$ zawierającym opory ruchu z ruchem robota q i wektorem a parametrów geometrycznych i masowych.

Robot MRKM jest układem nadmiarowym ma cztery układy wykonawcze, a z równań dynamiki można wyznaczyć tylko 3 sygnały sterowań. Doktorant założył, że brakujący sygnał sterujący zostanie wyznaczony z przyjętego założenia, że moc generowana przez układy wykonawcze MRKM jest taka sama, co pozwoliło wyznaczyć brakujący sygnał sterowania koła 2 zarówno dla ruchu dla ruchu z ustalonym kątem orientacji korpusu β (ruch omnikierunkowy), jak i dla klasycznego ruchu kołowego przy zmiennym kącie orientacji korpusu β .

Kolejny rozdział IV swojej dysertacji Doktorant poświęcił identyfikacji parametrycznej modelu matematycznego robota MRKM. Poprawna analiza dynamiczna układów złożonych (np. kołowych robotów mobilnych) wymaga identyfikacji parametrów dynamicznych równań ruchu. Spośród różnych podejść do procesów estymacji parametrów modelu matematycznego zostały wykorzystane w sekcji dwie metody: adaptacyjna i wsadowa, których podstawy zaczerpnięto z pracy [23]. Podstawowym zagadnieniem w tym procesie estymacji jest uzyskanie jak najwięcej informacji o właściwościach układu rzeczywistego. Metoda adaptacyjna umożliwia identyfikację parametryczną w czasie rzeczywistym podczas przeprowadzonego eksperymentu pomiarowego. Przedmiotem estymacji są wartości parametrów wektora a z równań dynamiki robota w formie (III.56) sprowadzonych do postaci liniowej (IV.1) względem parametrów a .

Eksperyment pomiarowy został przeprowadzony na stanowisku szybkiego prototypowania, które zostanie opisane w rozdziale VI.1. Ważnym elementem eksperymentu pomiarowego jest odpowiednie dobre pobudzenie układu rzeczywistego poprzez dobór trajektorii. Zadany tor ruchu ma kształt pętli i został opisany zgodnie z procedurą z sekcji III.3 w dwóch wariantach ruchu: omnikierunkowym i klasycznym kołowym. Po przyjęciu wartości początkowych estymowanych parametrów a i po przeprowadzeniu dwóch eksperymentów pomiarowych otrzymano estymaty parametrów, które osiągają wartości zbliżone dla obu przypadków.

W sekcji IV.2 Doktorant wykorzystał metodę wsadową w celu dokładniejszej estymacji parametrów modelu matematycznego. Metoda wsadowa jest metodą identyfikacji offline przeprowadzaną dla danych uzyskanych z eksperymentów pomiarowych identyfikacji metodą adaptacyjną. W tej metodzie aktualizacja parametrów a jest obliczana na podstawie średniego błędu dla wszystkich próbek w zestawie danych.

Walidację dokładności odwzorowania modelu matematycznego MRKM z oszacowanymi parametrami a zweryfikowano w przeprowadzonej symulacji (Matlab – Simulink) ruchu robota mobilnego po zadanych trajektoriach. Wygenerowane w symulacji sygnały sterowania u_s i prędkości $\dot{\varphi}_s$ kół robota zestawiono z danymi z eksperymentów pomiarowych. Proces walidacji pokazał zgodność oszacowanych parametrów z rzeczywistym ruchem robota. Wyniki uzyskane metodą wsadową dają lepsze rezultaty niż wyznaczone metodą adaptacyjną. Oszacowane parametry zostaną użyte do syntezy zaawansowanych algorytmów sterowania nadążnego robotem MRKM.

Sterowanie ruchem nadążnym robota mobilnego jest przedstawione w rozdziale V. Sterowania takie polega na tym, że wybrany punkt robota mobilnego ma przemieszczać się zadanej trajektorii w przestrzeni roboczej. Do rozwiązania tego problemu potrzebne są równania kinematyki odwrotnej (sekcja III.3) przy pomocy których wyznacza się parametry kątowe kół, a następnie z równań dynamiki (sekcja III.4) momenty napędzające koła. Doktorant przedstawił w rozdziale dwie metody sterowania nadążnego robotem MRKM: sterowanie odporne i sterowanie neuronowe.

W opracowanym modelu matematycznym robota wyznaczenie parametrów, jak pokazano w rozdziale IV, sprawiło pewien problem i były wyznaczone z pewnym oszacowaniem. Niektóre parametry mogą być zmienne w trakcie pracy np. opory ruchu. W sterowanie odpornym (krzepkim), na podstawie przeprowadzonych badań i wiedzy o robocie buduje się model, którego parametry określa się z przeprowadzonego oszacowania i z przewidywania przedziału zmienności. Projektowany następnie regulator odporny musi składać się z członu stabilizującego i z członów kompensujących nieliniowość obiektu. Powoduje to, że układ zamknięty pracuje poprawnie dla każdego obiektu mieszczącego się w założonych granicach zmienności parametrów. Przeprowadzone rozważania w sekcji V.1 pozwoliły Doktorantowi dokonać syntezy odpornego algorytmu sterowania nadążnego robota MRKM oraz przedstawić kompletny jego schemat (rys. V.1) i parametry.

W kolejnym kroku Doktorant przeprowadził badania symulacyjne ruchu robota budując model w programie Matlab – Simulink na podstawie opracowanego schematu układu sterowania odpornego, modelu matematycznego i oszacowanych w rozdziale IV wartości

parametrów a . Doktorant przyjął, że w badaniach symulacyjnych zakłócenie będzie występowało tylko w formie zmian oporów ruchu MRKM. Oznacza to zakłócenie będą dotyczyło tylko parametrów $a_{\Delta 5}$, $a_{\Delta 6}$, $a_{\Delta 7}$.

Doktorant przeprowadził 6 symulacji jazdy po trzech opisanych i opracowanych trajektoriach w rozdziale III: trajektorii prostoliniowej, w kształcie łuku pokonywanej ruchem omnikierunkowym ($\dot{\beta} = 0$) i w kształcie łuku realizowanej klasycznym ruchem kołowym ($\dot{\beta} \neq 0$). Każda trajektoria symulowana była dwukrotnie: w pierwszej symulacji przejazd był realizowany bez zakłóceń, w drugim przejeździe wprowadzane były zakłócenia w formie zmian parametrów $a_{\Delta 5}$, $a_{\Delta 6}$, $a_{\Delta 7}$ oporów ruchu MRKM. Przeprowadzone testy numeryczne dla przejazdów z zakłóceniami w pełni potwierdziły poprawność i odporność opracowanego algorytmu sterowania na tego typu zmiany parametryczne, zaś błędy nadążania wynikające ze zmian parametrów oporu ruchu robota nie przekraczają założonych wartości maksymalnych.

W sekcji V.2 Doktorant zajął się wykorzystaniem sieci neuronowych Random Vector Functional Link (RVFL) w sterowaniu nadążnym robota MRKM. Z punktu widzenia teorii sterowania najważniejszymi właściwościami sieci neuronowych są ich możliwości aproksymacji odwzorowań nieliniowych i te właściwości Doktorant wykorzystał do aproksymacji funkcji nieliniowej opisując dynamikę MRKM przy podstawowej znajomości charakterystyk modelowanego obiektu. Opracowany algorytm sterowania składa się z sieci neuronowej aproksymującej funkcję opisującą nieliniowość robota (V.27) oraz z regulatora PD (rys. V.26). Do syntezy sterowania siecią neuronową wykorzystano teorię stabilności Lapunowa. Celem syntezy było określenie sygnału sterowania i adaptacji wag sieci, tak aby realizowana trajektoria ruchu robota pokrywała się z zadaną pomimo zakłóceń.

W następnym etapie zostały przeprowadzone badania symulacyjne w programie Matlab - Simulink neuronowego sterowania nadążnego robotem. Sieć neuronowa składała się z sześciu neuronów z sigmoidalnymi funkcjami aktywacji z losowo wybranymi wagami warstwy wejściowej.

Wszystkie przeprowadzone symulacje były zrealizowana dla ruchu robota MRKM po tych samych trzech trajektoriach jak dla symulacji sterowania odpornego. Dla każdej trajektorii realizowano symulacje dwóch przejazdów bez i z zakłóceniami oporów ruchu. Wyniki symulacji potwierdziły odporność badanego układu sterowania neuronowego na wprowadzone zakłócenia w postaci zmian oporów ruchu robota. Błędy są szybko kompensowane, a wartości wag sieci neuronowych dążą do wartości bliskim wartością optymalnym.

Ostatnią częścią pracy doktorskiej były badania doświadczalne przeprowadzone w celu weryfikacji zaproponowanych przez Doktoranta algorytmów sterowania nadążnego robota MRKM, które zostały opisane i przedstawione w rozdziale VI. Badania pomiarowe zostały zrealizowane na stanowisku składającym się z robota mobilnego Husarion Panther, karty kontrolno-pomiarowej dSpace 1103 oraz komputera PC z pakietem programowym Matlab/Simulink. Pomiary w czasie rzeczywistym były możliwe dzięki karcie pomiarowej dSpace 1103 w której były realizowane algorytmy sterowania skompilowane w oprogramowaniu Simulink. Badania polegały na pomiarach parametrów jazdy robota po wybranych trajektoriach realizowanych za pomocą algorytmów nadążnego sterowania odpornego i nadążnego sterowania neuronowego. Badania wykonano na tych samych trzech trajektoriach na których przeprowadzono badania symulacyjne sterowań w rozdz. V. Podczas badań MRKM Doktorant wprowadził zakłócenia w oporach ruchu w postaci przeszkody leżącej na podłożu (pianka poliuretanowa) na którą robot wjeżdżał podczas jazdy po zadanej trajektorii.

Doktorant przyjął, że uzyskane zmierzone przebiegi weryfikacyjne są wysoce zbliżone do przebiegów symulacyjnych. Dokonując analizy rezultatów badań autor uznał, że wyniki są zbieżne z wynikami otrzymanymi w badaniach symulacyjnych, potwierdzają poprawność rozwiązania. Niewielkie różnice wynikają z niedokładności w oszacowaniu parametrów modelu dynamiki robota. Porównując algorytmy sterowania Doktorant uznał, że w przypadku jazdy po prostej sterowanie neuronowe lepiej sobie radzi od sterowania odpornego w kompensacji pojawiającego się błędu statycznego, zaś algorytmy sterowania odpornego lepiej sobie radzą w sterowaniu nadążnym robota w jeździe po łuku.

Ostatecznie Doktorant konkluduje, że oba zaproponowane algorytmy sterowania nadążnego są wydajane w sterowaniu robotami z kołami Mecanum. Przedstawiony algorytm sterowania oparty o sieć neuronową RVFL wymaga jedynie podstawowej wiedzy o obiekcie sterowania, zaś algorytm sterowania odpornego wymaga dobrego dobrania parametrów modelu i sterowania MRKM.

W ostatnim VII rozdziale Doktorant zawarł krótkie podsumowanie dysertacji, opisujące zakres i będące wyszczególnieniem dokonań oraz celów naukowych uzyskanych w czasie realizacji pracy. Autor wskazuje, że w wyniku badań i osiągnięcia celu powstały metody sterowania robotem MRKM, zostały przeprowadzone badania symulacyjne i doświadczalne oraz konkluduje, że uzyskane wyniki badań dokumentują prawdziwość postawionej tezy rozprawy doktorskiej. Za główne aspekty naukowe i osiągnięcia Autor uznaje m.in.:

- wyznaczenie równań kinematyki robota MRKM i rozwiązanie zadania odwrotnego kinematyki dla zadanych torów wybranego punktu robota,

- przeprowadzenie procesu identyfikacji parametrycznej dynamicznych równań ruchu robota,
- sformułowanie modelu numerycznego dynamicznych równań ruchu i przeprowadzenie badań symulacyjnych,
- wyznaczenie prawa sterowania odpornego na bazie teorii układów o zmiennej strukturze,
- zastosowanie teorii stabilności Lapunowa do oceny zamkniętego układu sterowania odpornego,
- synteza prawa sterowania neuronowego aproksymującego nieliniowość i zmienne warunki pracy badanego robota,
- wykazania stabilności neuronowego prawa sterowania na podstawie teorii stabilności Lapunowa.

Doktorant wskazuje jednocześnie kierunek swoich przyszłych badań w obszarze rozwoju inteligentnych systemów robotyki mobilnej. Dalsze prace planuje skupić na optymalizacji algorytmów sterowania, by zwiększyć ich efektywność i odporność na zakłócenia. W kolejnym kroku Autor planuje rozszerzenie możliwości robotów MRKM o szeroko pojęte systemy rozpoznawania obrazu, które pozwolą znacząco zwiększyć dokładność nawigowania i poprawią interakcje z otoczeniem.

3. Ocena podsumowująca recenzowaną pracę doktorską

Zakres tematyczny rozprawy mgr. inż. Macieja Kołodzieja, którą Doktorant sytuuje w dziedzinie mechatroniki zaliczyć można do dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna.

Recenzowana rozprawa dotyczy ciekawych ze względów naukowych i ważnych ze względów aplikacyjnych zagadnień z obszaru modelowania robotów mobilnych. Tematyka rozprawy jest aktualna i rozwijana w wielu ośrodkach naukowych na świecie, w tym także w ośrodku rzeszowskim. Problematyka rozprawy związana jest z szeroko pojętymi badaniami teoretycznymi i doświadczalnymi nad syntezą ruchu omnikierunkowych robotów z kołami Mecanum. Autor w pracy podjął tematykę budowy modeli kinematyki i dynamiki cztero kołowego robota z kołami wielokierunkowymi i wykorzystanie tych modeli w budowanym układzie sterowania nadążnego. Podstawowym celem pracy było dokonanie syntezy ruchu nadążnego z zastosowaniem sterowania odpornego i neuronowego nadmiarowego robota MRKM.

Problematyka dotycząca algorytmów sterowania jazdą robotów z kołami Mecanum w literaturze naukowej jest poruszana w publikacjach z wielu ośrodków badawczych, brak jest

jednak prac podejmujących problemy rzeczywistej doświadczalnej weryfikacji algorytmów. Stosowane obecnie metody analizy oraz syntezy sterowania są niepełne i wymagają uzupełnienia. Obecne rozwiązania, choć jak wskazuje Doktorant innowacyjne, często wymagają dużych zasobów obliczeniowych, co może ograniczać ich efektywność i możliwość zastosowań wymagających pracy w stanie rzeczywistym. Przedstawiony przegląd stanu wiedzy wskazuje na ważkość podjętej tematyki naukowej.

Pierwsze osiągnięcia naukowe Autora dotyczą matematycznego modelowania kinematyki (prostej i odwrotnej) i dynamiki robota MRKM przy użyciu klasycznych metod z użyciem macierzy transformacji, jak i wykorzystaniu przy budowie modelu dynamiki równań Maggiiego.

Kolejnym osiągnięciem naukowym Doktoranta był opracowanie postępowania identyfikacji parametrycznej modelu matematycznego robota MRKM. Poprawna analiza dynamiczna układów złożonych (np. kołowych robotów mobilnych) wymaga identyfikacji parametrów dynamicznych równań ruchu. Spośród różnych podejść do procesów estymacji parametrów modelu matematycznego zostały wykorzystane w pracy dwie metody: adaptacyjna i wsadowa.

Podstawowym osiągnięciem naukowym było rozwiązanie naukowe problemów analizy i syntezy sterowania nieholonomicznym nadmiarowym robotem z kołami Mecanum. Syntezę algorytmów sterowania Doktorant przeprowadził na podstawie dynamicznych równań ruchu. W syntezie sterowania odpornego wykorzystał teorię układów o zmiennej strukturze, zaś podstawą syntezy sterowania neuronowego było twierdzenie o uniwersalności aproksymacji nieliniowości siecią neuronową. Stabilność zamkniętego układu sterowania odpornego i stabilność neuronowego prawa sterowania została wykazana na podstawie teorii stabilności Lapunowa.

Ważnym aspektem niniejszej pracy było opracowania stanowiska badawczego i przeprowadzenie badań doświadczalnych jazdy robota po zadanej trajektorii z wprowadzonymi zakłóceniami oporów jazdy.

Praca stanowi pewnego rodzaju zasób wiedzy dotyczącej modelowania i syntezy algorytmów sterowania, identyfikacji parametrycznej modeli, budowy modeli matematycznych opisujących zadania kinematyki i dynamiki nadmiarowego robota z kołami Mecanum. Przedstawione w dysertacji postępowania i opracowane algorytmy zostały zrealizowane dla robota Husarion Panther, lecz metodologia i opracowane sterowania mogą znaleźć skuteczne zastosowania do modelowania i syntezy algorytmów sterowania obiektów podobnej klasy. Doktorant wykazał się umiejętnością oceny uzyskanych rozwiązań przy wykorzystaniu wskaźników ilościowych na podstawie danych uzyskanych z symulacji i badań

doświadczalnych. Przedstawiony przez Doktoranta w doktoracie sposób analizy i syntezy sterowania nadmiarowym robotem z kołami Mecanum jest jego autorskim rozwiązaniem.

Realizacja pracy wymagała dobrego opanowania warsztatu naukowca, w szczególności wiedzy z obszaru mechaniki robotów mobilnych, teorii sterowania i znajomości aparatu matematycznego wykorzystywanego w opisie ich kinematyki, dynamiki i sterowania oraz kompetencji z zakresu modelowania komputerowego. Wykonane prace zostały opisane w sposób logicznie uporządkowany, a zakładane cele zostały zrealizowane.

Godnym podkreślenia jest, że wyniki badań i rozważań teoretycznych zostały opublikowane przez Doktoranta i Promotora w formie trzech recenzowanych artykułów w renomowanych czasopismach.

Przechodząc do ogólnej oceny pracy stwierdzam, że praca Pana mgr. inż. Macieja Kołodzieja przedstawia nowe podejście do rozwiązania problemu naukowego, którego celem było opracowanie i zweryfikowanie na robocie rzeczywistym metod sterowania, które będą poprawne w realizowaniu zadania sterowania nadążnego oraz mniej obciążające obliczeniowo.

Teza postawiona w niniejszej dysertacji pt.: "Synteza ruchu mobilnego robota z kołami mecanum" została udowodniona. Przedstawione w rozdziałach II - VII rozważania i opracowane modele matematyczne kinematyki i dynamiki, dokonane syntezy algorytmów nadążnego sterowania odpornego i neuronowego oraz przeprowadzone badania symulacyjne i doświadczalne dokumentują teoretycznie i na przykładach liczbowych skuteczność opracowanych metod i algorytmów sterowania.

4. Uwagi krytyczne i szczegółowe

1. Przyjęty przez Doktoranta model kinematyki i dynamiki ruchu robota MRKM zakłada ruch po płaszczyźnie i zawiera założenia toczenia kół bez poślizgów wzdłużnych oraz poprzecznych. W przypadku kół Mecanum, w których styk z podłożem jest realizowany poprzez sztywne baryłkowe rolki dość łatwo nieodpowiednim sterowaniem momentem napędowym kół doprowadzić do zerwania przyczepności. Czy pominięcie poślizgów nie wprowadza dużych ograniczeń w użyciu modeli do budowy algorytmu sterowania rzeczywistymi obiektami?

Czy w przeprowadzonych przez Doktoranta badaniach doświadczalnych jazdy robota po wybranych torach po niejednorodnym podłożu wystąpiły poślizgi kół?

Założenie jazdy po płaskiej powierzchni wprowadza jednak pewne zastrzeżenia do użycia modeli dynamiki jazdy robota MRKM po rzeczywistym terenie z

nierównościami. Czy modele dynamiki i algorytmy sterowania opracowane przez Autora można rozbudować by uwzględnić jazdę robota po terenie z określonymi nierównościami?

2. W podsumowaniu pracy Doktorant wskazuje, że głównymi osiągnięciami było m.in.: przeprowadzenie procesu identyfikacji parametrycznej dynamicznych równań ruchu robota metodą adaptacyjną i wsadową, wyznaczenie prawa sterowania odpornego na bazie teorii układów o zmiennej strukturze oraz synteza prawa sterowania neuronowego aproksymującego nieliniowość i zmienne warunki pracy badanego robota. Podstawy teoretyczne tych metod w teorii sterowania są znane i dobrze opracowane m. in w pracy [23]. Czy osiągnięciem naukowym Doktoranta jest tylko wykorzystanie tych metod i zaadaptowanie do procesu identyfikacji parametrów modelu i syntezy algorytmów sterowania robota MRKM?

3. Podstawowym i niezbędnym elementem prac związanych z syntezą mobilnego robota z kołami Mecanum jest model dynamiki obiektu. W rozdziale III.4 jest przytoczony gotowy model w formie równań Maggiiego przytoczony z prac [27, 29]. Czy dokonaniem Autora jest tylko wykorzystanie gotowego modelu do sformułowania modelu numerycznego i badań symulacyjnych, czy zostały dokonane modyfikacje teoretyczne by go dostosować do rzeczywistego obiektu?

W rozdziale III.4 model jest bardzo zwięźle opisany. Brak odniesienia parametrów z równań do obiektu rzeczywistego. W szczególności brak jest opisów i interpretacji bardzo ważnych parametrów a_5 , a_6 i a_7 opisujących opory ruchu. Na jakiej podstawie uzyskano ich wartości (tab. III.4)?

4. W rozdziale III.2 analizującym kinematykę robota Autor podaje, że należy skupić się w równaniach opisujących ruch robota. Równania te powinny pozwolić określić liniowe parametry ruchu – drogę, prędkość i przyspieszenie punktu S na korpusie w powiązaniu z kątami obrotu, prędkościami i przyspieszeniami kątowymi kół MRKM. Wyprowadzone i przedstawione w tym rozdziale równania dotyczą głównie tylko prędkości, pominięte zostały równania położenia i przyspieszenia. W kolejnych rozdziałach możemy odnaleźć wykresy, na których odnajdujemy przebiegi wybranych położenia i przyspieszenia liniowych i kątowych parametrów robota. Dlaczego Doktorant nie przytoczył tych równań w dysertacji?

5. W rozdziale III. 3 rozwiązującym zadanie odwrotne kinematyki Autor definiuje zadane trajektorie ruchu robota. W planowaniu prędkości toru przyjęty jest trapezowy profil z wyróżnionym rozpędzaniem, ruchem ustalonym i hamowaniem, dla którego zostaną wyznaczone prędkości robota. Po czym Autor konstatuje, że należy wyeliminować

- naturalną nieróżniczkowalność trapezowego profilu i dokonuje jego aproksymacji. Czy wiedząc, że przebiegi prędkości muszą być różniczkowalne Doktorant nie mógłby przyjąć od razu profilu różniczkowalnego?
6. W rozdziale IV.1 przy przeprowadzaniu procedury identyfikacji parametrów metodą adaptacyjną Doktorant podaje (str. 43), że warunki początkowe estymowanych parametrów (tab. IV.2) ze względu na zastosowanie procedury gradientowej, wybrane zostały po licznych przeszukaniu przestrzeni parametrów, tak aby uniknąć ekstremum lokalnego funkcji celu. Na czym polegało i jak zostało przeprowadzone liczne przeszukiwanie przestrzeni parametrów? Czy przyjęcie innych warunków początkowych estymowanych parametrów przy realizacji procedury identyfikacji spowodowałoby uzyskanie innych wartości wektora parametrów a ?
 7. Doktorant wskazał, że jednym z celów tej dysertacji jest opracowanie i zweryfikowanie metod sterowania rzeczywistym robotem MRKM, które będą skuteczne w realizowaniu zadania sterowania nadążnego oraz wydajne i mniej obciążające obliczeniowo. W konkluzjach końcowych pada stwierdzenie, że ten cel został osiągnięty. Jak Autor potrafi uzasadnić, że jego algorytmy są wydajne i mniej obciążające obliczeniowo, jeżeli w pracy nie przedstawił żadnego uzasadnienia i porównania wydajności obliczeniowej z innymi algorytmami?
 8. Obiekt badań (rozdział III) robot Husarion Panther nie został w pełni opisany. Tabela parametrów robota nie zawiera wartości tak istotnych parametrów jak promień koła R i promień rolki r . Braki wartości tych parametrów utrudniają choćby prawidłową interpretację wartości parametrów wektora a równań dynamiki. W rozdziale VI Doktorant podał, że zakłóceniem zwiększającym opory ruchu MRKM będzie najazd na piankę poliuretanową o wysokości 50 mm – istotnym jest porównanie jej wysokości do promienia R koła robota.
 9. Realizując w rozdziale V badania symulacyjne Doktorant podał na stronie 60, że wartości Δa_5 , Δa_6 , Δa_7 zakłóceń przedstawione w tab. V.5 związane ze zmianą oporów ruchu MRKM zostały oszacowane na podstawie pomiarów na stanowisku weryfikacyjnym. W rozdziale VI opisującym badania weryfikacyjne Doktorant nie przeprowadził żadnych pomiarów zakłóceń i tylko podał w tabeli VI.3 oszacowane wartości powyższych zakłóceń. W jaki sposób Doktorant uzyskał wartości tych parametrów użytych później w badaniach i symulacjach?
 10. Praca została napisana w zasadzie poprawnym językiem, choć Autor nie ustrzegł się użycia w tekście zwrotów kolokwialnych (np. „Literatura donosi są to ...”, „Co daje

układ ...”). Kolejnym mankamentem pracy jest bardzo dużo błędów interpunkcyjnych (pominięcie przecinków lub ich nieprawidłowe usadowienie). Praca zawiera też pewną liczbę różnego typu pomyłek w tekście – błędy literowe, pomyłki w numeracji rysunków i tabel, błędne odwołania do wzorów i rysunków, drobne błędy we wzorach. Pomyłki w tekście o znacznej objętości są oczywiście nieuniknione. Z recenzenckiego obowiązku wspominam o dostrzeżonych pomyłkach, których – ze względu na ich nieistotność dla odbioru pracy – nie warto tu szczegółowo dyskutować.

5. Wniosek końcowy

Reasumując, pomimo pewnych uwag krytycznych i dyskusyjnych, stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Macieja Kołodzieja pt.: **”Synteza ruchu mobilnego robota z kołami mecanum”** jest oryginalna i spełnia wymagania, jakie stawia pracom doktorskim, ustawa z dnia 14 marca 2003 r o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595, z późn. zm.).

Merytorycznie praca odpowiada standardom stawianym pracom doktorskim w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i na tej podstawie stawiam wniosek o dopuszczenie przedmiotowej pracy do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Naukowej Inżynierii Mechanicznej Politechniki Rzeszowskiej.

M. Baranowski