Wrocław, dn. 17.02.2022 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. Wincentego Skwarka

pt.:" **Kinetyka współpracujących robotów**"

Promotor: **dr hab. inż. Andrzej Burghardt, prof. PRz.**

Promotor pomocniczy: **dr hab. inż. Krzysztof Kurc, prof. PRz.**

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą opracowania recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Wincentego Skwarka było pismo Przewodniczącego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej nr RM-530-02-03/18/2021 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 5 rozdziałów, wykaz 130 pozycji literatury, wykaz ważniejszych oznaczeń, streszczenia w języku polskim i angielskim na łącznie 138 stronach.

W rozdziale 1 autor zawarł przegląd literatury, cel 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 formacji robotów mobilnych i wskazał na sposoby rozwiązania tych problemów za pomocą modelowania i budowy modeli teoretycznych.

Kolejne analizy literaturowe dotyczyły rozważań nad pojęciami: model i modelowanie. Przytaczając literaturę Doktorant przedstawił trzy główne zastosowania modeli w technice – w badaniach naukowych, projektowaniu i sterowaniu. Wskazał, że w każdym z tych obszarów

modele pełnią inne rolę: w badaniach naukowych służą do interpretacji posiadanej lub uzyskanej wiedzy, w projektowaniu modele mogą posłużyć do symulowania komputerowego tworzonego obiektu, w sterowaniu istotne jest zastosowanie modeli matematycznych przy tworzeniu algorytmów sterowania.

Przytaczając definicję modelu według [68, 96] Autor podaje, że „*model jest to opis zasadniczych cech istniejącego lub projektowanego układu, dostarczający wiedzy o nim w formie użytecznej*". Przystępując do budowy modelu należy go tworzyć w trzech etapach: budując model nominalny (opisujący zasadnicze cechy i procesy, które występują w badanym obiekcie), następnie definiując model fizyczny (taki który można materialnie zrealizować uwzględniając cechy przyjętego wcześniej modelu nominalnego), na koniec budując model matematyczny (będący analitycznym zapisem zachowywania się modelu fizycznego przy pomocy szeregu zależności matematycznych – w przypadku układów mechanicznych są to układy równań algebraicznych lub różniczkowych).

W kolejnej części przeglądu Autor przytoczył prace dokonujące klasyfikacji modeli układów mechanicznych według różnych kryteriów, przytaczając możliwe podziały modeli na: strukturalne bądź funkcjonalne, ciągłe, dyskretne lub dyskretno-ciągłe, liniowe i nieliniowe, stacjonarne i niestacjonarne, statyczne i dynamiczne, o czasie ciągłym i czasie dyskretnym, proste, odwrotne i uogólnione, modele jednowejściowe i wielowejściowe, modele jednowymiarowe i wielowymiarowe.

Doktorant wskazał, że we współczesnej technice modelowanie jest stosowane w wielu aspektach działalności człowieka, stąd mnogość ich typów, różnorodność klasyfikacyjna i szerokie wykorzystanie w inżynierii mechanicznej.

Autor konstatuje, że obecnie jesteśmy świadkami kolejnej rewolucji przemysłowej - zmienił się sposób projektowania maszyn i urządzeń, zmieniły się narzędzia projektowania, stosowane jest projektowanie w ujęciu mechatronicznym. Mechatroniczne projektowanie oparte o modele i przepływ informacji przyspiesza prace oraz powoduje, że powstałe produkty są bardziej innowacyjne.

Mechatroniczne podejście do projektowania w oparciu o modele dotyczy również szeroko pojętej robotyki mobilnej, pozwala na opracowanie nowych systemów wielorobotowych poszerzając zakres ich potencjalnego zastosowania. Autor wskazuje, że zapotrzebowania na modele współpracujących robotów mobilnych, były jego inspiracją podjęcia tematyki badawczej związanej z modelowaniem tego typu układów.

W dokonanym przeglądzie literatury przez Doktoranta występuje bardzo duża liczba prac dotyczących zagadnień współpracy robotów kołowych zarówno niepowiązanych ze sobą

więzami fizycznymi jak i układów połączonych więzami. Autor w przeglądzie literatury skoncentrował się na analizie prac dotyczących grup mobilnych robotów przewożących wspólnie różnego rodzaju obiekty. Tematyka w analizowanych pracach dotyczy problemów związanych z transportem obiektów, ich przeładunkiem, sprzątaniem, a nawet eksploracją planet. Obiekty mogą być przepychane ślizgowo, mogą posiadać własne podparcie w postaci kół, mogą być przewożone przez robota lub grupę współpracujących robotów. Jako układy transportujące wykorzystywane są najczęściej roboty kołowe bądź gąsienicowe. Problemy poruszane w analizowanej literaturze dotyczą m.in. strategii jazdy i współpracy robotów, algorytmów sterowania, planowania trajektorii jazdy lidera, algorytmów kontroli kształtu formacji i konieczności jej zmiany wyniku konieczności omijania przeszkód. Istnieje też duża grupa prac dotycząca opisu zależności kinematycznych i dynamicznych współpracujących ze sobą robotów. Do opisu dynamiki autorzy używają najczęściej równań Newtona, Newtona-Eulera lub równań Lagrange'a II rodzaju z mnożnikami.

Podsumowując przegląd literatury Doktorant stwierdza, że tematyka dotycząca modelowania zadań dynamiki transportu obiektów o dużych gabarytach w literaturze naukowej jest poruszana w niewielkiej liczbie publikacji, brak jest prac z opisem modeli współpracujących robotów uwzględniających ich oddziaływania dynamiczne, a w modelowaniu stosowanych jest szereg uproszczeń. Doktorant wskazał tu miejsce na swoje autorskie badania i analizy.

Dokonany przegląd literatury pozwolił doktorantowi w rozdziale 1.2 sformułować cel i zakres pracy doktorskiej. *Celem pracy jest budowa modeli matematycznych o właściwościach aplikacyjnych opisujących zadania dynamiki układów mechanicznych złożonych ze współpracujących, nieholonomicznych robotów kołowych, transportujących obiekt.*

Rozdział pierwszy autor zakończył podpunktem 1.3 w którym opisał genezę problemu związanego z zagadnieniami współpracy robotów mobilnych. Autor wywodzi, że zagadnienie współpracy zostało zaczerpnięte z obserwacji przyrody. Dzięki życiu w stadzie wykształciły się odpowiednie zachowania zwierząt, które umożliwiły realizację celów niemożliwych do wykonania przez pojedynczego osobnika (zdobywanie pokarmu przez zwierzęta drapieżne (wilki) czy wspólny transport dużych rzeczy (mrówki)).

We współczesnej technice takie zadania mogą realizować formacje robotów, które przy skoordynowaniu działań mogą wykonywać różnorodne zadania niewykonalne przez pojedynczego robota. Do typowych zadań realizowanych przez grupę robotów mobilnych można współcześnie zaliczyć: kierowanie ruchem robotów we wspólnym środowisku, przepychanie obiektów (manipulowanie i transportowanie), przeszukiwanie i pokrycie

obszarów (m.in. sprzątanie, poszukiwanie obiektów, zbieranie owoców), obserwacja wielu celów oraz realizacja gier zespołowych.

Formacje robotów mogą znaczenie różnić się od siebie. Autor przytacza sposoby klasyfikacji grup robotów przy uwzględnieniu różnych kryteriów. Formacje możemy klasyfikować m.in.: ze względu na rozmiar, ze względu na zasięg, przepustowość i topologię komunikacji, ze względu na możliwości reorganizacji formacji, ze względu na zdolności przetwarzania danych przez pojedynczego robota formacji, ze względu na skład formacji (jednorodna/niejednorodna), ze względu na stopień centralizacji planowania trajektorii. Autor przyjął, że w niniejszej pracy będą wykorzystywane małe (od 2 do 4 sztuk) formacje robotów kołowych (PAIR i LIM-GROUP).

W rozdziałach 2 - 5 Doktorant zawarł naukowe rozwiązanie problemów modelowania dynamiki współpracujących robotów kołowych transportujących obiekt po płaskiej, gładkiej powierzchni.

W rozdziale 2 przedstawił metodologię modelowania kinematyki formacji robotów. Formacja jest złożona z kołowych robotów AmigoBot, które wspólnie transportują obiekt. Obiekt jest połączony z każdym robotem przy pomocy obrotowej pary kinematycznej. Takie podejście stanowi, że formacja robotów może być traktowana jako jeden złożony mechanizm o wielu napędach. W rozdziale autor podjął się rozwiązania zadania prostego i odwrotnego kinematyki formacji robotów. Zadanie proste kinematyki formacji polega na wyznaczeniu ruchu transportowanego obiektu dla znanych parametrów kinematycznych kół napędzających roboty, zaś zadanie odwrotne kinematyki polega na wyznaczeniu parametrów kinematycznych kół napędzających roboty dla znanego ruchu transportowanego obiektu.

W pierwszej części rozdziału autor opracował generator trajektorii, którego zadaniem jest generowanie przebiegów czasowych prędkości liniowej punktu M należącego do transportowanej bryły oraz prędkości kątowej transportowanego obiektu. Opracowaną trajektorię autor wykorzystuje w symulacjach rozwiązań zadań kinematyki oraz dynamiki jazdy formacji robotów.

Pierwszą analizowaną formacją była grupa 2 robotów transportujących sztywną belkę (rys. 2.6). Belka do robotów była zamocowana w uchwytach na zaczepach umiejscowionych przed przednią osią robota. Równania opisujące zadanie proste i odwrotne kinematyki autor wyprowadził 2 metodami. W pierwszej wykorzystał klasyczne metody modelowania i geometrii pisząc oraz rozwiązując jawnie równania analityczne. Równania więzów w wygodnej formie jakobianowej zostały zawarte w równaniu (2.23). W drugiej metodzie wykorzystał rachunek macierzowo-wektorowy korzystając z klasycznego zapisu opartego na notacji

Denavita-Hartenberga. Wyprowadzone równania macierzowe Autor rozwiązał symbolicznie przy użyciu pakietu matematycznego Maple.

Kolejną modelowaną formacją była grupa n robotów transportujących sztywną bryłę umocowaną przy użyciu zaczepów umiejscowionych przed przednimi osiami robotów (rys. 2.7). Równania na przykładzie formacji 4 robotów Doktorant wyprowadził przy pomocy rachunku macierzowo-wektorowego. W pierwszej kolejności autor wyprowadził równania kinematyki wiążące prędkości wybranego robota i z prędkościami transportowanego obiektu. Do rozwiązania zadania prostego kinematyki wystarczy uwzględnić tylko prędkości kątowe kół 2 spośród n współpracujących robotów, ponieważ pozostałe prędkości kątowe są zależne.

Ostatnią rozpatrywaną formację była grupa 2 robotów transportująca sztywną belkę zamocowaną w zaczepach usytuowanych nad przednią osią każdego robota (rys. 2.8). Tego typu usytuowanie belki jest korzystne z punktu widzenia obciążenia robota (zmniejsza siły nacisku), jednak powoduje to, że formacja podczas ruchu może przyjąć konfiguracje osobliwe i w wyprowadzonych równaniach kinematyki należy to uwzględnić. Dla tej formacji równania kinematyki Autor wyprowadził metodą klasycznego modelowania. Równania kinematyki zapisane zostały również w postaci jakobianowej (2.85) i w postaci związku pomiędzy prędkościami uogólnionymi i prędkościami sterowalnymi (2.88). Występujące w tych równaniach macierze **J** i **D** Autor wykorzystał do sprawdzenia warunku (2.90) czy można wyrugować mnożniki Lagrange'a za pomocą metody rzutowej z równań dynamiki.

Rozdział 2 autor zakończył przeprowadzając symulacje w środowisku matematycznym Matlab/Simulink uzyskanych modeli opisujących kinematykę ruchu poszczególnych formacji robotów.

W rozdziale 3 Doktorant opracował model matematyczny opisujący dynamikę nieholonomicznej formacji robotów transportujących obiekt. W rozdziale tym zostały przedstawione metody, które pozwoliły osiągnąć postawiony w rozdziale 1 naukowy cel pracy. Do budowy modelu dynamiki formacji robotów wykorzystano równania Lagrange'a II rodzaju z mnożnikami. W opracowanych modelach dynamiki autor przyjął, że pojedynczy robot składa się z 3 członów: ramy i 2 kół, wszystkie człony to ciała doskonale sztywne, założył brak poślizgów kół napędowych robotów i brak tarcia w połączniu transportowanego obiektu z robotem. Podobnie jak w przypadku kinematyki Autor budując modele dynamiki formacji robotów rozwiązał zadania proste i odwrotne dynamiki. Pierwsze z zadań polega na wyznaczeniu ruchu (prędkości i przyspieszeń) kół robotów dla znanych momentów napędowych. W przypadku gdy znany jest ruch kół robotów, a wyznaczane są momenty napędowe mamy do czynienia z zadaniem odwrotnym dynamiki.

W pierwszej kolejności model dynamiki został opracowany dla formacji złożonej z dwóch robotów transportujących obiekt - belkę zamocowaną do robota w zaczepach usytuowanych nad przednią osią (przypadek osobliwy), której różniczkowe równania w formie równań Lagrange'a II rodzaju zapisane zostały w równaniu (3.1). Kinematyka tej formacji została opisana w rozdziale 2.5. Po wyznaczeniu sił uogólnionych **Q** z zasady prac przygotowanych oraz lagrangianu **E** (w przypadku ruchu po płaskiej powierzchni jest równy całkowitej energii kinetycznej) i dokonaniu przekształceń otrzymano dynamiczne równania ruchu formacji robotów w postaci macierzowo - wektorowej (równanie 3.32). Występujące w tym równaniu mnożniki Lagrange'a zostały wyeliminowane przy zastosowaniu metody rzutowej polegającej na zbudowaniu dynamicznych równań ruchu zrzutowanych do przestrzeni współrzędnych sterowalnych. Transformacje pomiędzy wektorem prędkości uogólnionych i wektorem prędkości sterowalnych Autor zawarł w (2.88) w rozdziale 2. Wykorzystując macierze **D**, **J** z równań (2.86) i (2.89) i dokonując odpowiednich przekształceń wyznaczono ostateczny model opisujący dynamikę analizowanej formacji robotów w przestrzeni pozbawionej nieznanych sił tarcia suchego w postaci równania (3.46). Na podstawie tego równania ruchu Autor rozwiązał zadania proste i odwrotne dynamiki oraz przeprowadził symulacje.

Drugą formacją, dla której opracowano model dynamiki był przypadek współpracy 2 robotów kołowych przewożących belkę zamocowana w uchwytach na zaczepach umiejscowionych przed przednimi osiami kół robotów. Wykorzystując opis kinematyki tej formacji z rozdz. 2.2 i 2.3 oraz równania, sposób modelowania dynamiki analogiczny jak dla formacji z rozdz. 3.1 opracowano model dynamiki bez mnożników Lagrange'a niezbędny do rozwiązania zadania prostego i odwrotnego w postaci (3.58).

Ostatnią analizowaną formacją, dla której doktorant opracował model dynamiki była formacja zbudowana z trzech robotów transportujących obiekt zamocowany przed przednią osią kół robotów (rys. 3.5). Używając analogicznego sposobu modelowania dynamiki jak dla formacji zbudowanych z dwóch robotów oraz używając opisu kinematyki wyprowadzonego przy użyciu metody Denavita-Hartenberga dla n robotów w rozdz. 2.4 Autor wyprowadził dynamiczne równania ruchu w postaci (3.64). Do wyprowadzenia równań dynamiki ze względu na złożoność problemu Autor wykorzystał pakiet oprogramowania matematycznego Maple.

W ostatnim punkcie tego rozdziału dla opracowanych modeli dynamiki formacji 3 robotów zostały przeprowadzone symulacje z wykorzystaniem pakietu Matlab/Simulink z użyciem zbudowanego emulatora pracy formacji robotów. Przeprowadzone obliczenia i symulacje dla wszystkich przypadków oraz wynikająca z nich zgodność wyników z rozwiązania zadania

odwrotnego kinematyki i zadania prostego dynamiki świadczą o poprawności opracowanych modeli.

W rozdziale 4 Doktorant opisał zastosowanie i weryfikacje modelu dynamiki wybranej formacji robotów. Badania eksperymentalne doktorant przeprowadził na stanowisku szybkiego prototypowania algorytmów sterowania robotów mobilnych AmigoBot opracowanego w Katedrze Mechaniki Stosowanej i Robotyki Politechniki Rzeszowskiej. Do badań i weryfikacji wybrano zadanie transportu belki przez 2 roboty AmigoBot zamocowanej w zaczepach nad osią kół robotów. Model kinematyki tej formacji został przedstawiony w rozdz. 2.5, model dynamiki został opisany w rozdz. 3.1. Równania dynamiki tej formacji (3.46) zostały rozszerzone o modele dynamiczne napędów (silników prądu stałego) z przekładniami do postaci (4.5). Badania eksperymentalne polegały na ruchu układu wzdłuż trajektorii punktu M, której sposób generowania został opisany w rozdziale 2.1. Rozwiązując zadanie odwrotne kinematyki Autor otrzymał prędkości kątowe kół napędzających roboty, które wykorzystał jako parametry zadane w procesie weryfikacji. Jako wyniki weryfikacji Autor dysertacji przedstawił przebiegi prędkości kół napędzających roboty oraz momenty napędzające wyznaczone zarejestrowane podczas eksperymentu. Dokonując analizy rezultatów badań autor uznał, że wyniki są zbieżne z wynikami otrzymanymi w badaniach symulacyjnych, potwierdzają poprawność rozwiązania zadań dynamiki formacji.

W rozdziale 5 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 osiągniecia celu powstała metodologia tworzenia modeli kinematyki i dynamiki formacji robotów kołowych transportujących obiekt. Autor konkluduje, że opracowane matematyczne modele dynamiki można wykorzystać w syntezie układów sterowania wskazując jednocześnie na kierunek swoich przyszłych badań.

3. Ocena podsumowująca recenzowaną pracę doktorską

Zakres tematyczny rozprawy mgr. inż. Wincentego Skwarka zaliczyć można do dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna. Tematyka rozprawy związana jest z szeroko pojętymi badaniami teoretycznymi nad wykorzystaniem robotyki mobilnej do automatyzacji transportu ładunków. Jedną z możliwości rozwiązania tego zagadnienia jest wykorzystanie grup współpracujących robotów mobilnych do transportu obiektów o dużych gabarytach. Jak Autor wskazuje poszukiwanie nowych rozwiązań w tym obszarze generuje zapotrzebowanie na opracowanie matematycznego modelu kinematyki i dynamiki zespołu robotów uwzględniających ich wzajemne oddziaływanie. Zadania opracowania metodyki budowy

modeli matematycznych formacji robotów mobilnych w transporcie wielkogabarytowym w niniejszej rozprawie podjął się Doktorant. Problematyka dotycząca modelowania zadań dynamiki transportu obiektów o dużych gabarytach w literaturze naukowej jest poruszana w stosunkowo niewielkiej liczbie publikacji, brak jest prac z opisem modeli współpracujących robotów uwzględniających ich oddziaływania dynamiczne. W modelowaniu stosowanych jest szereg uproszczeń, najczęściej polegających na modelowanie obiektów jako masy skupione lub jak pojedyncze ciała o znanej macierzy bezwładności. Stosowane obecnie metody analizy są niepełne i wymagają uzupełnienia. Przegląd stanu wiedzy wskazuje na ważkość podjętej tematyki naukowej.

Pierwsze osiągnięcia naukowe Autora dotyczą metodologii matematycznego modelowania kinematyki formacji robotów transportujących przy użyciu klasycznych metod modelowania, jak i wykorzystaniu macierzowo-wektorowej notacji Denavita-Hartenberga. Opracowane modele opisują zadania kinematyki prostej i odwrotnej formacji zbudowanej z 2 lub n robotów kołowych transportujących obiekt. Autor zauważył, że wykorzystanie formacji zbudowanej z większej liczby robotów powoduje, że układ jest nadmiarowy i nie wszystkie roboty pracują niezależnie. Doktorant wykazał, że możliwe jest wykorzystanie tej własności już na etapie budowy równań ruchu w postaci jakobianowej, gdzie możliwe jest wyeliminowanie nadmiarowych robotów z równań.

Kolejnym osiągnięciem naukowym Doktoranta był opracowanie postępowania matematycznego przy budowaniu modeli dynamiki formacji robotów podczas wykonywania zadań transportowych. Do wyprowadzenia różniczkowych równań ruchu wykorzystane zostały równania Lagrange'a II rodzaju z mnożnikami. Postępowanie obejmowało procedurę rugowania mnożników z równań ruchu przy zastosowaniu metody rzutowej. Wykorzystując wyznaczone równania ruchu formacji zostały rozwiązane przez Autora zadania proste i odwrotne dynamiki. Autor wykazał również, że macierz będąca różnica pochodnej macierzy bezwładności względem czasu i podwojonej macierzy współczynników sił odśrodkowych i Coriolisa jest macierzą skośnie symetryczną. Własność ta umożliwia podczas syntezy układu sterowania wykazanie stabilności układu zamkniętego.

Przedstawiony przez Doktoranta w dysertacji sposób modelowania formacji robotów wykonujących zadania transportowe jest jego autorskim rozwiązaniem. Praca stanowi pewnego rodzaju zasób wiedzy dotyczącej budowy modeli matematycznych opisujących zadania dynamiki układów mechanicznych złożonych ze współpracujących robotów kołowych.

Przechodząc do ogólnej oceny pracy stwierdzam, że praca Pana mgr inż. Wincentego Skwarka przedstawia oryginalne podejście do rozwiązania problemu naukowego, którego

celem była budowa modeli matematycznych o właściwościach aplikacyjnych opisujących zadania dynamiki układów mechanicznych złożonych z formacji nieholonomicznych robotów kołowych transportujących obiekt.

Cel pracy "Kinetyka współpracujących robotów" został osiągnięty. Przedstawione w rozdziałach 2 - 4 rozważania i opracowane modele matematyczne kinematyki i dynamiki dokumentują teoretycznie i na przykładach liczbowych (przeprowadzone symulacje i eksperymenty) możliwości opracowanej metodyki modelowania dynamiki współpracujących, nieholonomicznych kołowych robotów transportujących obiekt.

4. Uwagi krytyczne i szczegółowe

Uwagi merytoryczne:

1. Autor w rozdziale 1 dokonał szerokiego, interesującego, szczegółowego przeglądu stanu wiedzy. Wydaje się jednak, że pewna grupa informacji związana z podstawami teoretycznymi modelowania matematycznego, budowaniem modeli (nominalny, fizyczny, matematyczny), klasyfikacją modeli jest nadmiarowa – Autor nie wykorzystał jej do opisu tworzonych własnych modeli. Podobny problem dotyczy dokonania wyczerpującego opisu i podziału formacji współpracujących robotów względem bardzo różnych kryteriów (wielkości formacji, zasięgu, przepustowości i topologii komunikacji, sposoby rekonfiguracji, itd.) by wykorzystać do określenia wykorzystywanej grupy robotów tylko kryterium liczności. Czy Autor mógłby opisać i sklasyfikować utworzone modele i formacje robotów zgodnie z przytoczonym opisem?
2. Recenzowana dysertacja zatytułowana jest „Kinetyka współpracujących robotów", zaś celem pracy jest budowa modeli matematycznych o właściwościach aplikacyjnych, opisujących zadania dynamiki układów mechanicznych złożonych ze współpracujących, nieholonomicznych robotów kołowych, transportujących obiekt. Doktorant w treści dysertacji nie użył wykorzystanego w tytule pojęcia „Kinetyka współpracujących robotów" i nie odniósł się do niego formułując cele pracy i tworząc opisy wyprowadzanych modeli. Jak Autor definiuje pojęcie „kinetyka robotów" w kontekście postawionego celu pracy?
3. Pewnym mankamentem opracowanych modeli dynamiki formacji robotów są przyjęte założenia i uproszczenia dotyczące jazdy po płaskiej powierzchni oraz toczenia kół bez poślizgów wzdłużnych i poprzecznych. Pominięcie poślizgów, przy założeniu ruchu ze stosunkowo małymi prędkościami kół i przy zapewnieniu dużej przyczepności kół do

podłoża, nie wprowadza dużych ograniczeń w użyciu modeli do budowy algorytmu sterowania rzeczywistymi obiektami. Założenie jazdy po płaskiej powierzchni wprowadza jednak pewne zastrzeżenia do użycia modeli dynamiki jazdy formacji robotów po rzeczywistym terenie z nierównościami. Czy modele dynamiki opracowane przez Autora można rozbudować by uwzględnić jazdę formacji po terenie z określonymi nierównościami?

4. W rozdziale 2 Autor opisuje lakoniczne formacje robotów „w skład której wchodzą dwa roboty kołowe AmigoBot i „rozważono opis układu robotów połączonych bryłą za pomocą więzów (para kinematyczna klasy V)". W tekście zabrakło informacji czy odniesienia do literatury o budowie i parametrach modelowanych robotów AmigoBot. Opis robotów można odnaleźć dopiero w rozdziale 4.
5. Transportowana bryła jest połączona z robotami obrotową parą kinematyczną o jednym stopniu swobody ruchu względnego tworzących ją członów. Autor definiuje i opisuje w pracy to połączenie jako parę kinematyczną V klasy. Nie jest to jednoznaczne określenie – zgodnie ze stosowaną terminologią w polskich uczelniach jest to para I lub V klasy w zależności od stosowanej klasyfikacji (zostawione/odebrane stopnie swobody).
6. Połączenie robotów z transportowanym obiektem parami obrotowymi wpływa na sterowanie jazdą poszczególnych robotów. W przypadku jazdy formacji złożonej z n robotów ruch 2 robotów jest niezależny, a pozostałych jest już zdeterminowany. Ogranicza to m.in. możliwości wyboru strategii jazdy i współpracy robotów czy możliwości wpływania na kształt formacji podczas jazdy. Czy Autor rozważał inne połączenia transportowanego obiektu z robotami np. parami stykowymi?
7. Rozdział 2.5 Autor tytułuje „Kinematyka dwóch współpracujących robotów – przypadek osobliwy". W rozdziale tym analizowana jest kinematyka dwóch współpracujących robotów transportujących belkę zamocowaną do robotów w punktach leżących nad osią kół (rys. 2.8). Czy nie jest to szczególna postać formacji robotów opisanych w rozdz. 2.2 dla wartości parametru $l_3 = 0$ m? Czy opis tej formacji wymaga powtarzania wyprowadzeń wszystkich wzorów?

   Na czym polega osobliwość tej formacji? Czy tylko na możliwości wystąpienia matematycznych osobliwości w równaniach zadania odwrotnego kinematyki? Jakie konfiguracje przyjmuje formacja w punktach osobliwych?

   W przeprowadzonych symulacjach kinematyki i dynamiki tej formacji Autor (rozdz. 2.6.3 i 3.4.) analizując rezultaty wskazuje, że występują osobliwości w rozwiązaniu nie precyzując w których punktach realizowanej trajektorii.

8. Uzyskane równanie prędkości (2.83) wynika z zróżniczkowania względem czasu równania (2.81) opisującego związek geometryczny pomiędzy kątami φ, β_1, β_2. Z przytoczonych w pracy rysunków i wzorów nie wynika jak wyprowadzono równanie (2.81). Jak Autor uzasadnia przyjęcie takiej formuły tego wzoru?
9. Autor wykazuje w rozdziale 3, że wynikające z dynamicznych równań ruchu macierze **S** i $\mathbf{S}_N$ są skośnie symetryczne i konkluduje, że jest to kluczowa właściwość umożliwiającą dalsze wykorzystanie opracowanego modelu dynamiki w syntezie układu sterowania. Jakie są możliwości wykorzystania modelu i tych właściwości macierzy w syntezie układów sterowania? Dlaczego Autor nie wykorzystał tej właściwości w swojej pracy?
10. Rozdziały 3.1 i 3.2 Doktorant kończy stwierdzeniami „Na podstawie otrzymanych dynamicznych równań ruchu rozwiązano zadanie odwrotne i proste dynamiki". Czy Autor mógłby podać jak rozwiązane zostały równania ruchu?
11. W rozdziale 4.2 Autor zamieszcza wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych jazdy formacji robotów w celu weryfikacji opracowanych metod. Przytoczone są tylko przebiegi pomiarów prędkości kątowych kół robotów i momentów napędzających koła podczas jazdy po zadanej trajektorii. Czy Autor dysponuje pomiarami innych parametrów? Otrzymane przebiegi są analizowane tylko jakościowo i jak stwierdza Doktorant wykazują podobieństwa z charakterystykami zadanymi. Analizy jakościowe bez dokonania oceny ilościowej nie mogą być podstawa do wyciągania ogólnych wniosków oceniających poprawność metody. Czy Autor posiada wyniki analiz ilościowych np. błędów w realizacji zadanych parametrów?

Uwagi szczegółowe:

- Autor w pracy stosuje nietypowe i niepotrzebne oznaczenia jednostek przy opisie wartości parametrów np. v_M= 0,5 [m/s] zapisując je w nawiasach kwadratowych,
- str. 35 – w wierszu 7 jest c= , powinno być c_1=,
- str. 36 – parametr l nie opisuje długości belki, tylko odległość miedzy punktami H_1 i H_2,
- rys. 2.5 – nie oznaczono jak mierzone są kąty obrotu kół α_{ii},
- str. 42 – wzór (2.26) w równaniach 3 i 4 jest β_1, powinno być β_2,
- str. 43 – jest „Na postawie", powinno być „Na podstawie",
- rys. 2.6 – brak na rysunku punktów S_1 i S_2 i układów z nimi związanych, brak w tekście opisu punktów K_i i P_i,

- str. 46 – ze wzoru (2.38) wynika, że przyjęto wartość $z_M = r$, a w tekście i na rysunkach nie podano tej informacji,
- str. 47 – wzór (2.44) niepoprawnie opisuje współrzędne punktu styku kół względem układów związanych z kołami,
- str. 58 – wzór (2.70) jest $\dot{\beta}_i =$; $\dot{\beta}_j =$, a powinno być $\dot{\beta}_{if} =$; $\dot{\beta}_{jf} =$,
- str. 62 – wzór (2.76) jest powtórzeniem (2.10),
- str. 62 – wzór (2.77) jest powtórzeniem (2.12),
- str. 62 – wzór (2.78) jest powtórzeniem (2.17),
- str. 63 – wzór (2.79) jest powtórzeniem, ma postać równania (2.16) dla $l_3=0$,
- str. 63 – wzór (2.80) jest powtórzeniem, ma postać równania (2.18) dla $l_3=0$,
- str. 66 – jest „Ponadto z równań (2.95)", powinno być „Ponadto z równań (2.94)",
- str. 68 – wzór (2.105) jest powtórzeniem, ma postać równania (2.58) dla $l_3=0$,
- str. 68 – wzór (2.106) jest powtórzeniem, ma postać równania (2.59) dla $l_3=0$,
- rys. 2.9 – schemat blokowy na rysunku opisuje symulacje zadań kinematyki w Matlabie/Simulinku formacji złożonej tylko z 2 robotów, a powinien uwzględniać formacje zbudowaną również z 4 robotów,
- rys. 2.10a – nie zaznaczono położenia punktu M na belce,
- rys. 2.11a – nie zaznaczono położenia punktu M na obiekcie,
- rys. 2.17a – nie zaznaczono położenia punktu M na belce,
- str. 82 – na rys. 3.1 przedstawiono siły P_{ii} (siły nacisku kół robota) do których nie ma odniesienia w tekście i we wzorach,
- str. 83 – wzory (3.4 – 3.11) jest T_{ii}, a powinno być $T_{ii}\ r$,
- str. 86 – wzór (3.20) – wzór ma postać, która nie wynika z postaci macierzy **J** ze wzoru (2.86),
- str. 97 – wzór (3.51) – w macierzy niepoprawnie powtórzono wpis mnożników λ_i,
- rys. 3.6 – schemat blokowy na rysunku opisuje symulacje zadań dynamiki w Matlabie/Simulinku formacji złożonej tylko z 2 robotów, a powinien uwzględniać formacje zbudowaną również z 3 robotów,
- rys. 4.7 – brak etykiet a) i b) wykresów,
- rys. 4.8a – nie zaznaczono położenia punktu M na belce.

5. Wniosek końcowy

Reasumując, stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Wincentego Skwarka, pt. „**Kinetyka współpracujących robotów**" - jest oryginalna i spełnia wymagania, jakie stawiają pracom doktorskim, Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki, Ustawa z dnia 21 kwietnia 2017 o Zmianie Ustawy o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki oraz Ustawa z dnia 20 lipca 2018 Prawo o Szkolnictwie Wyższym.

Merytorycznie praca odpowiada jednocześnie 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.

J. Bałdowski

Wrocław, dn. 17.02.2022 r.