

Recenzja rozprawy doktorskiej

Mgr. inż. Przemysław Sperzyński pod tytułem

„Modelowanie ruchu robota kołowo-kroczącego w terenie z nierównościami”

Podstawą opracowania recenzji rozprawy doktorskiej mgr. inż. Przemysław Sperzyński było pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego z dnia 5 czerwca 2023 roku.

1. Ocena aktualności wybranego tematu

Człowiek od niepamiętnych czasów dążył do konstruowania systemów lokomocji, rozwiązań ułatwiających mu transport, umożliwiających przemieszczanie czy pokonywanie dużych odległości. Od zastosowania równi pochyłej, wynalezienia koła, aż po czasy obecne tematyka ta jest aktualna. Konstruktorzy dążą do opracowania systemów przemieszczania o funkcjonalnościach organizmów żywych, budując roboty latające, pływające, pełzające, kroczące. Rozwój w obszarze napędów, sensorów, algorytmów sterowania, a przede wszystkim rozwiązań akumulacji energii sprawiły, że systemy transportowe uzyskują autonomiczność.

W obszarze rozwiązań konstrukcyjnych największe możliwości odnośnie prędkości, możliwości transportu dużych mas mają rozwiązania bazujące na napędach kołowych. Ich największą wadą jest natomiast brak możliwości poruszania się w nierównym terenie, pokonywanie przeszkód czy występowanie ograniczeń geometrycznych. W ostatnich latach w transporcie w celu eliminacji ograniczeń niehomonimicznych kołowych pojazdów mobilnych wprowadza się koła omniskierunkowe. O ile zwiększanie możliwości ruchowych pojazdów kołowych nie jest w obecnym czasie dużym problemem to fakt funkcjonalności pozwalającej na pokonywanie przeszkód terenowych nie znalazł rozwiązań przyjętych jako standard czy na tyle uniwersalnych, aby dać producentom czy konstruktorom przewagę rynkową. Jest to obszar naukowy dziś szczególnie eksplorowany, zwłaszcza przez fakt możliwości implementacji w zastosowaniach militarnych. Niedostępne są dziś systemy

lokomocji występujące w środowisku naturalnym zwłaszcza owadów. Konstruktorzy inspirowani wzorcami biologicznymi budują autonomiczne roboty latające, pływające, pełzające, skaczące czy też hybrydy przytoczonych rozwiązań.

Autor dysertacji podjął tematykę konstrukcji mobilnego robota, którego rozwiązanie konstrukcyjne z założenia połączy zalety kołowego robota mobilnego i robota kroczącego. Pozwoli to na przemieszczanie z dużymi prędkościami w terenie utwardzonym bez przeszkód oraz w razie konieczności powolne pokonywanie - wykorzystując kroczenie - poprzecznych przeszkód terenowych.

Konkludując podjęta przez Doktoranta w dysertacji problematyka modelowania ruchu robota kołowo-kroczącego w terenie z nierównościami jest w mojej ocenie aktualna.

2. Przegląd treści pracy

Treść opiniowanej rozprawy doktorskiej mgr. inż. Przemysława Sperzyńskiego zawiera 149 stron podzielonych na 7 rozdziałów oraz bibliografię obejmującą 86 pozycji literaturowych wykorzystywanych podczas przygotowania dysertacji. Praca zawiera 86 rysunków oraz 17 tabel.

Pracę rozpoczyna wstęp wprowadzający w tematykę robotyki mobilnej w aspekcie podziału ze względu na rodzaj lokomocji. Dalej znajdujemy aktualny stan wiedzy w analizowanym obszarze przeprowadzony na przykładzie dostępnej literatury. W szczególności Autor koncentruje się na robotach z kołami podporowymi, robotach czterokończynowych, sześciokończynowych oraz robotach balansujących. Rozdział pierwszy kończy się zdefiniowaniem celu pracy i opisem jej zakresu poprzedzony analiza algorytmów pokonywania przeszkód.

Opracowanie konstrukcji Doktorant rozpoczyna od syntezy strukturalnej robota mobilnego, przyjmuje założenia dotyczące mechanizmu kończyny robota z uwzględnieniem jej możliwości kroczenia. Pozwala to na propozycję kilku rozwiązań konstrukcyjnych mechanizmu kroczenia.

Obszerny rozdział trzeci sprowadza się do określenia wymiarów liniowych i kątowych członów mechanizmu kończyny robota. Syntezę geometryczną mechanizmu rozpoczyna przyjęcie szeregu założeń, następnie przedstawiono opis zadania odwrotnego i prostego kinematyki mechanizmu kończyny, określono dla niego strefę roboczą oraz opisano położenia osobliwe. Dalej przeanalizowano mechanizm poziomowania. Autor przeprowadza syntezę geometrii mechanizmu kończyny wykorzystując algorytmy genetyczne. Pozwala to finalnie na określenie wartości wymiarów elementów opracowanej konstrukcji.

Dla tak opracowanych wartości w rozdziale czwartym opisano kinematykę mechanizmu kończyny wykorzystując notację Denavita-Hartenberga. Uwzględniono osobliwości, założono sposób opisu przebiegów prędkości i przyspieszeń, tak aby uzyskać jak nazywa to Autor „gładki ruch”. Otrzymane rozwiązanie zasymulowano w programie Matlab.

Opracowanie konstrukcji nieodzownie wiąże się z doбором napędów co implikuje konieczność przeprowadzenia opisu dynamiki obiektu, którą Autor dysertacji przeprowadza w rozdziale piątym. Znajdujemy tu opis wykorzystujący równania Euler-Lagrange z wprowadzonymi ograniczeniami homonimicznymi. Opis przedstawiono w postaci

macierzowej z uwzględnieniem oddziaływania podłoża. Rozdział kończy numeryczna weryfikacja rozwiązania przeprowadzona w środowisku programowym Adams. W rozdziale znajdujemy również bardzo krótki opis algorytmu sterowania zamodelowany w oprogramowaniu Matlab/Simulink.

Rozdział szósty zawiera opis przestrzennego modelu robota. Zdefiniowano w nim model podłoża i kół robota oraz określono model ich styku. Wyprowadzono kinematyczny model robota kołowo-kroczącego poruszającego się po nierównym terenie, przy założeniu braku poślizgów. Otrzymane rozwiązanie zasymulowano.

Wnioski końcowe pracy zamieszczono w rozdziale siódmym, w których potwierdzono realizację założonego celu i zakresu rozprawy. Autor ponadto nakreślił kierunki dalszych badań, które pozwoliłyby udoskonalić proponowane rozwiązanie.

Spis literatury uwzględnia szereg prac z zakresu omawianej tematyki badawczej, w tym wiele prac o podstawowym znaczeniu dla rozważanego problemu, zawiera również pięć współautorskich publikacji Doktoranta.

Treść dysertacji podaje uniwersalną autorską metodykę syntezy mechanizmu kończyny robota kołowo-kroczącego i przedstawia numeryczny model jego ruchu zweryfikowany numerycznie w symulacjach.

3. Wyniki pracy i ich ocena

Propozycja połączenia najpopularniejszego sposobu lokomocji jak rozwiązania kołowe z kroczeniem, które pozwala na pokonywanie przeszkód terenowych w celu uzyskania konstrukcji o funkcjonalnościach dotąd niespotykanych jest zasadna zarówno z naukowego jak i praktycznego znaczenia.

Podjęta przez Autora dysertacji problematyka naukowa dotyczy syntezy konstrukcji robota kołowo-kroczącego oraz modelowania zadań kinematyki, dynamiki i symulacji ruchu opracowanej konstrukcji.

Na tej podstawie zdefiniowany cel pracy Autor logicznie rozwijał w kolejnych rozdziałach. Zaproponował konstrukcję robota, przeprowadził syntezę geometryczną mechanizmu kończyny robota kołowo-kroczącego. Dla tak otrzymanego rozwiązania samej kończyny, wykonał opis kinematyki oraz zasymulował ruch. Analogicznie rozwiązano zadanie dynamiki kończyny. Następnie rozwiązano problem opracowania modelu kinematycznego jazdy robota i jego symulacji.

Zaprezentowana metodologia pracy, opracowane modele są poprawne.

Autor podczas pisania pracy wykazał się dobrym rozeznaniem w rozpatrywanej problematyce naukowej. Na podkreślenie zasługuje sprawność w organizacji warsztatu badawczego i umiejętność wyciągania właściwych wniosków z przeprowadzanych analiz, pozostaje tu jak wspominałem pewien niedosyt jeśli chodzi o dążenie do weryfikacji choćby częściowych rozwiązań. Sposób przedstawiania rozważań jest zrozumiały i przekonujący. Poszczególne etapy pracy świadczą o dobrym przygotowaniu merytorycznym Autora oraz o jego umiejętności prowadzenia prac badawczych. Warto tu zwrócić uwagę na wielorakość stosowanych narzędzi i metod, których właściwe używanie wymaga solidnej podbudowy teoretycznej i doświadczenia. Strona edytorska rozprawy jest na wysokim poziomie.

Są rzeczy które są dyskusyjne, wymagają komentarza albo wyjaśnień.

Uwagi ogólne

- praca dotyczy optymalizacji konstrukcji robota kołowo-krocącego oraz jego opisu matematycznego w postaci modelu. Tytuł pracy odnosi się jedynie do drugiej części zakresu pracy i w mojej ocenie nie oddaje całości zagadnień, których dotyczy dysertacja.
- praca dotyczy robota kołowo-krocącego co wymaga rozbudowanych analiz oraz dekompozycji zadań. Właśnie wyposażenie robota kołowego w możliwość kroczenia w celu pokonywania przeszkód jest w mojej ocenie największą wartością dodaną. Autor dysertacji obliczenia przeprowadza dla takiego rozwiązania, a finalnie symulacje przeprowadza w środowisku niewielkich płaskich nierówności. Czytelnik ma wrażenia dużego niedosytu, niedokończonej pracy.
- jako duży minus całej pracy uważam brak eksperymentalnej weryfikacji opracowanej konstrukcji, czy na etapie opracowania samej kończyny czy finalnie dla całości rozwiązania.
- podrozdział 5.4 dotyczy zagadnienia sterowania kończyną robota. Bazując na rozwiązaniach literaturowych zdefiniowano uogólniony błąd nadążania oraz przyjęto algorytm sterowania z kompensacją nieliniowości obiektu. Przedstawiono również schemat symulacyjny układu oraz jeden wykres dotyczący osiągniętych wyników. Cały rozdział zamknięto na trzech stronach pracy. Problematyka sterowania jest jednak bardzo rozległym zagadnieniem, w skład którego wchodzi m.in analiza właściwości strukturalnych modelu matematycznego i synteza sterowania z dowodem stabilności. Tego w tym rozdziale zdecydowanie zabrakło. Symulację sterowania przeprowadzono dla wyizolowanego układu, czyli pojedynczej kończyny, nie biorąc pod uwagę wpływu ruchu całego robota, czyli zakłóceń działających na kończynę. Wątpliwości budzi równanie (5.80), które rzekomo dotyczy opisu regulatora PD, a w rzeczywistości zawiera wzmocnienie zmienne w funkcji całki z kwadratu błędu nadążania. Nasuwa się pytanie, czy doktorant dysponuje dowodem stabilności takiego układu sterowania i zna jego właściwości ?
- co oznacza sformułowanie „dynamiczny układ sterowania” w podpisie pod rysunkiem 5.14 ?
- w pracy na stronie 28 znajdujemy sformułowanie „nieholonomiczne ograniczenia wynikające z założenia braku poślizgu”. Z definicji, o nieholonomicznym charakterze obiektu w opisie matematycznym świadczy niecałkowalność więzów, czy inaczej ograniczeń narzuconych na prędkości, a nie fakt występowania poślizgu. Koło toczące się bez poślizgu jest obiektem holonomicznym. Proszę o wyjaśnienie.
- Doktorant wielokrotnie w pracy w odniesieniu do opisu funkcji stosuje nazewnictwo „gładkie” np. str. 79 pogrubioną czcionką mamy „Założenie gładkiego ruchu”. Następnie zakłada funkcję przyspieszeń i poprzez całkowanie otrzymuje „gładkie” wykresy prędkości i przyspieszeń. W praktyce stosuje się opis trajektorii ruchu jako funkcji klasy C2, dwukrotnie różniczkowalnej. Pozwala to na planowanie ruchu, podejście odwrotne

oczywiście da wynik poprawny, ale implementacyjnie jest bezzasadne. W pracy nie doszukałem się wyjaśnienia dlaczego wykorzystywane opisy prędkości czy przyspieszeń mają być „gładkie”, proszę o wyjaśnienie.

- Autor używa sformułowań weryfikacja numeryczna, proponuje sformułowanie, symulacja numeryczna poprawności rozwiązania, a wyraz weryfikacja niech odnosi się do obiektów rzeczywistych.
- kilka razy autor używa sformułowania „weryfikacja macierzy np. C, D, B”, jak czytelnik ma rozumieć takie sformułowanie, że dalej będzie dowód czy macierz jest macierzą ?

Uwagi szczegółowe

Występujące w pracy błędy edytorskie, stylistyczne czy językowe nie wpływają znacząco na jakość przekazywanych informacji. Poniżej wymienię błędy, na które należy zwrócić szczególną uwagę w przyszłości.

- str. 6 dwukrotnie ilość kończyn robota, powinno być liczba
- str. 11 nie objechanie, a ominięcie przeszkody
- str. 22 raz robota nazywany LegVan raz Legvan
- str. 23 masa przeważy, kolokwializm
- str. 28 gładki sposób wymuszenia ruchu, kolokwializm
- str. 113 ilość kończyn, ilość połączeń, powinno być liczba
- str. 15, rys. 1.5 rysunek wiszący
- str. 18, rys. 1.10 rysunek wiszący
- str. 20, rys. 1.13 rysunek wiszący
- str. 21, rys. 1.15 rysunek wiszący
- str. 66, rys. 3.20 rysunek wiszący
- str. 71, tab. 4.1 tabela wisząca
- str. 84, rys.4.10 rysunek wiszący
- str. 87, rys.5.1 rysunek wiszący
- str. 88, rys.5.2 rysunek wiszący
- str. 99, tab. 5.2 tabela wisząca
- str. 115, rys.6.2 rysunek wiszący
- str. 118, rys.6.3 rysunek wiszący
- nie kończymy rozdziału podrozdziału rysunkiem wypunktowaniem czy tabelą.

Konkludując wskazane błędy językowe, edytorskie, zapożyczenia czy zwroty o charakterze slangowym nie wpływają znacząco na jakość przekazywanych treści. Są wskazówką dla Autora na przyszłość, pozwalającą na unikanie takich samych czy analogicznych nieprawidłowości.

4 Wnioski końcowe

Dysertacja zawiera metodykę projektowania konstrukcji robota kołowo-kroczącego, obszerną syntezę geometrii kończyny, w której wybór najlepszego w danej klasie rozwiązania zrealizowano z użyciem algorytmów genetycznych. Dla otrzymanego rozwiązania konstrukcyjnego kończyny Autor przeprowadził analizę zadań kinematyki i dynamiki. Ponadto przedstawił opis przestrzennego modelu kinematyki robota, który zawierał model podłoża, kół oraz ich styku. Poprawność podjętych rozważań została potwierdzona symulacjami komputerowymi.

Uważam, że opiniowana praca Pana mgr. inż. Przemysława Sperzyńskiego spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w rozumieniu Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 roku, poz.1669), Ustawy z 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (tekst jednolity Dz. U. z 2016 roku poz. 882 ze zmianą: Dz. U. z 2016 roku poz. 1311) oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 26 września 2016 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzenia czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2016 roku poz. 1586), i może być dopuszczona do dalszego procedowania.

Andrzej Burghavett