

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra inż. Przemysława Sperzyńskiego
zatytułowanej

Modelowanie ruchu robota kołowo-kroczącego w terenie z nierównościami

Recenzja została opracowana na prośbę z dnia 5 czerwca 2023 r. przesłaną przez prof. dra hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego – Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna na Politechnice Wrocławskiej.

1. Informacje i komentarze dotyczące zawartości rozprawy

Rozprawa doktorska mgra inż. Przemysława Sperzyńskiego, zatytułowana *Modelowanie ruchu robota kołowo-kroczącego w terenie z nierównościami*, została opublikowana w 2023 roku na Politechnice Wrocławskiej. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Krzysztof Jacek Bałchanowski, prof. uczelni.

Rozprawa jest napisana w języku polskim. Dzieło liczy 149 stron, w tym 140 stron tekstu zasadniczego, poprzedzonego dwoma streszczeniami (po polsku i po angielsku), spisem treści i listą używanych oznaczeń. Główna część rozprawy zawiera 7 rozdziałów i spis literatury (86 pozycji). Struktura dzieła jest przejrzysta, logicznie uporządkowana i typowa dla tego rodzaju opracowań.

Rozdział 1 rozpoczyna się od przedstawienia motywacji do podjęcia badań nad hybrydowymi robotami kołowo-kroczącymi, a dalej zawiera przegląd stanu wiedzy oraz prezentację celu i zakresu pracy.

W punkcie 1.1, nominalnie poświęconym przeglądowi literatury, autor zaprezentował przykłady robotów łączących funkcję jazdy na kołach z funkcją kroczenia, dzieląc je w sposób systematyczny na kilka grup. Przegląd przeprowadzony jest przede wszystkim pod kątem struktury kinematycznej i możliwości ruchowych omawianych robotów. Punkt 1.2 również dotyczy przeglądu literatury (w tym miejscu występuje niekonsekwencja w hierarchii rozdziałów), tym razem jednak autor skupia się na zagadnieniach związanych ze sterowaniem i z algorytmami pokonywania przeszkód.

Przegląd stanu wiedzy, bazujący głównie na publikacjach z ostatnich lat, wskazuje na dobrą orientację autora w kwestiach związanych z konstrukcjami mechanicznymi i strukturami robotów hybrydowych. Pewnym mankamentem przeglądu jest niewielka ilość odniesień do niektórych zagadnień kluczowych dla recenzowanej rozprawy, przede wszystkim do metod syntezy kinematycznej oraz do algorytmów modelowania kinematyki i dynamiki robotów mobilnych (w obszarze modelowania warto byłoby np. przyrzeć się możliwościom oferowanym przez system ROS). Wskazane braki łagodzą nieco znajdujące

się w dalszych rozdziałach rozprawy odniesienia literaturowe (pozbawione są jednak szerszego kontekstu, typowego dla przeglądu stanu wiedzy).

W punkcie 1.3 autor klarownie przedstawił cel główny pracy – „opracowanie metodyki modelowania ruchu czterołożynowego robota kołowo-kroczącego w terenie z nierównościami” – oraz towarzyszące mu cele szczegółowe. Opis zakresu prac jest również przejrzysty. Szkoda jedynie, że elementy nowości naukowej nie zostały odpowiednio silnie zaakcentowane (warto byłoby dowiedzieć się, jakie osiągnięcia autor uważa za najistotniejsze).

Rozdział 2 dotyczy syntezy strukturalnej robota i jest podzielony na trzy części. W pierwszej z nich autor sformułował wymagania dotyczące ruchliwości kończyn, określając zapotrzebowanie na realizowane rodzaje ruchów i liczbę stopni swobody. W części drugiej równania ruchliwości zostały wykorzystane do wytypowania schematów podstawowych łańcuchów kinematycznych, które dzięki odpowiednio dobranej liczbie członów i par kinematycznych umożliwiają uzyskanie zakładanych możliwości ruchowych. Szczegółowo zaprezentowano trzy najbardziej obiecujące schematy podstawowe. W części trzeciej autor przeanalizował różne warianty schematów kinematycznych odpowiadające schematom podstawowym, przedstawiając sześć propozycji, a następnie dokonując wyboru jednej z nich.

Na podkreślenie zasługuje systematyczność podejścia – autor w sposób uporządkowany wykorzystał pochodzące z teorii maszyn i mechanizmów metody syntezy kinematycznej, stosując je w sposób adekwatny do specyficznych potrzeb wywodzących się z charakteru projektowanego mechanizmu. Zaprezentowanie metodyki postępowania przy określaniu struktury kinematycznej kończyn robota kołowo-kroczącego należy uznać za jedno z osiągnięć pracy. Warto byłoby jednak przedstawić nieco więcej informacji na temat reguł wyboru docelowego rozwiązania spośród wielu propozycji.

Rozdział 3 poświęcono optymalizacji wymiarowej mechanizmu o schemacie kinematycznym wybranym we wcześniejszym rozdziale. Również ten rozdział dzieli się na trzy części. W podrozdziale 3.1 autor określa ograniczenia dotyczące gabarytów robota oraz formułuje wymagania odnoszące się do minimalnych wielkości przeszkód, które robot powinien być w stanie pokonać, a następnie definiuje zbiór mających podlegać optymalizacji zmiennych decyzyjnych – podstawowych wymiarów robota.

Podrozdział 3.2 dotyczy kinematyki mechanizmu kończyny. Autor przedstawia sposób uzyskania analitycznych rozwiązań zadania prostego i odwrotnego kinematyki, analizuje przestrzeń roboczą kończyny oraz możliwe konfiguracje osobliwe (analiza osobliwości budzi pewne zastrzeżenia, do których powrócę w dalszej części recenzji). Osobny podpunkt poświęcony jest analizie mechanizmu poziomowania platformy; wykorzystywane jest przy tym założenie, że w wyniku optymalizacji wymiarowej uda się skonstruować mechanizm będący prostowodem przybliżonym (przy pewnej ustalonej długości napędu s_2). Wyprowadzone w tym podpunkcie wzory prowadzą do obliczenia pochodnej wysokości platformy y_F względem sterowanej zmiennej θ_1 , pozwalają zatem na badanie równomierności ruchu podnoszenia platformy.

Podrozdział 3.3 opisuje proces optymalizacji wymiarowej kończyny robota. Doktorant zaproponował autorską listę celów (kryteriów optymalizacyjnych), a następnie niektórym z nich nadał użyteczną w obliczeniach formę wzorów matematycznych. Autor podzielił proces wyznaczania optymalnych zbiorów zmiennych decyzyjnych na etapy, w pierwszym z nich wykorzystał metodę optymalizacji

opartą na algorytmach genetycznych. Na końcu rozdziału zostały zaprezentowane wyniki optymalizacji.

Przedstawioną w rozprawie metodykę postępowania podczas określania optymalnych wymiarów mechanizmu należy uznać za oryginalny wkład autora. Zaprezentowane wyniki świadczą, że pozwoliła ona osiągnąć założony cel, jednak niektóre aspekty postępowania powinny zostać szerzej omówione. Na przykład nie jest do końca jasne, dlaczego optymalizacja została podzielona na kilka etapów (czy nie można było zoptymalizować większej liczby zmiennych decyzyjnych w ramach jednego procesu?), dlaczego spośród dostępnych metod wybrano akurat algorytm genetyczny. Sam sposób sformułowania i wykorzystania funkcji celu również wymaga dodatkowych wyjaśnień – powrócę do tej sprawy w dalszej części recenzji.

Rozdział 4 poświęcono kinematyce mechanizmu kończyny na poziomie prędkości i przyspieszeń, a w jego drugiej części zagadnieniom kształtowania trajektorii i symulacji kinematycznej ruchu kończyny. Rozdział 4 zatytułowany jest tak samo jak podrozdział 3.2, co wprowadza drobne zamieszanie – w tytule rozdziału 4 warto byłoby ujawnić, że dotyczy on prędkości i przyspieszeń.

Podrozdział 4.1 wykorzystuje notację Denavita-Hartenberga i towarzyszący jej zapis w formie transformacji jednorodnych. Pracowicie wyprowadzane równania, intensywnie wykorzystujące jakobiany geometryczne dla wybranych punktów i członów, dotyczą najpierw otwartych łańcuchów kinematycznych, a następnie analiza zostaje rozszerzona na łańcuchy zamknięte. W efekcie znalezione zostają – zapisane w formie nierekurencyjnych wzorów analitycznych – zależności pomiędzy prędkościami napędów a pochodnymi (względem czasu) zmiennych zależnych. W dalszej części podrozdziału autor, różniczkując równania odnoszące się do prędkości, wyprowadził wzory dotyczące przyspieszeń.

W punkcie 4.1.3 powraca analiza konfiguracji osobliwych (por. rozdział 3), tym razem przeprowadzona w bardziej sformalizowany sposób, wykorzystujący badanie macierzy Jacobiego. W zaprezentowanych rozważaniach prawidłowo uznano, że konfiguracja osobliwa mechanizmu charakteryzuje się degeneracją rzędu macierzy Jacobiego. Jednak pierwszy akapit punktu 4.1.3 zawiera nieścisłości (stwierdzenia, z którymi trudno się zgodzić) i wymaga sprostowania.

W podrozdziale 4.2 autor zaproponował sposób generowania odpowiednio gładkich trajektorii w przestrzeni złącz – zdefiniował funkcję opisującą wymuszenie kinematyczne realizowane przez siłownik. Następnie wykorzystał tę funkcję w symulacji (kinematycznej) ruchu kończyny i zaprezentował jej wyniki. W obliczeniach symulacyjnych wykorzystane zostały wzory wyprowadzone we wcześniejszych częściach rozprawy.

Zagadnienia omówione w rozdziale 4 są typowe dla robotyki. Autor skorzystał ze znanych sposobów opisu otwartych łańcuchów kinematycznych. Warto jednak zwrócić uwagę na nietypowy sposób wprowadzania napędu – zarówno pierwszy, jak i drugi człon w łańcuchu otwartym napędzane są przez siłowniki zamocowane (przegubowo) do podstawy mechanizmu. Taka szeregowo-równoległa struktura kończyny komplikowała nieco obliczenia. Wyprowadzenie wzorów w postaci analitycznej sprzyja wykorzystywaniu ich w układzie sterowania robota.

Rozdział 5 przedstawia model dynamiki kończyny robota, zapisany w formie równań ruchu, opracowany z wykorzystaniem formalizmu Lagrange'a. Model ten jest następnie weryfikowany poprzez porównanie z modelem symulacyjnym zbudowanym w środowisku MSC.Adams. Rozdział

kończy przykład wykorzystania modelu dynamiki w symulacji procesu sterowania ruchem kończyny robota.

W podrozdziale 5.1 autor wyprowadził wzory opisujące energię kinetyczną i potencjalną członów robota, służące zapisaniu lagranżjanu, a następnie ułożył równania Lagrange'a dla układu z rozłączonymi pętlami kinematycznymi. W punkcie 5.1.4 uwzględniona została obecność pętli kinematycznych i wynikające z niej zależności między zmiennymi opisującymi mechanizm kończyny. Ostatni punkt podrozdziału dotyczy obliczania jacobianu odpowiadającego punktowi przyłożenia siły reakcji podłoża. Należy zwrócić uwagę, że w wywodzie z punktu 5.1.4 jest pewna niekonsekwencja. Autor wprowadza równania więzów krępujących współrzędne oraz zapisuje równania Lagrange'a I rodzaju (z mnożnikami), po czym jednak stosuje metodę podziału współrzędnych, uzależniając lagranżjan jedynie od współrzędnych niezależnych, i pozostaje przy opisie dynamiki w formie równań Lagrange'a II rodzaju.

Tytuł podrozdziału 5.2 jest dość enigmatyczny – trudno się domyślić, czego tekst będzie dotyczył. Nie ułatwia tego również brak otwierającego podrozdział słowa wstępnego. Dopiero skrupulatna lektura pozwala odkryć, że w podrozdziale przedstawiono bardziej szczegółowo macierze i wektory wykorzystywane wcześniej w punkcie 5.1. Zawartość podrozdziału 5.2 mogłaby być przedstawiona w formie załącznika do rozprawy.

Podrozdział 5.3 przedstawia model kończyny przygotowany w programie Adams, służący numerycznej weryfikacji modelu dynamiki z wcześniejszych podrozdziałów. Ciekawym i wartym podkreślenia pomysłem, wykorzystanym w podrozdziale 5.3, jest taki dobór symulacji przeprowadzanych w programie Adams, by można było osobno weryfikować wyodrębnione elementy (macierze i wektory) modelu dynamiki wyprowadzanego w postaci wzorów analitycznych. Takie podejście ułatwia detekcję ewentualnych błędów, które przy mniej starannym doborze testów byłyby trudne do odnalezienia.

Model dynamiki z punktów 5.1 i 5.2 wykorzystano w podrozdziale 5.4. Posłużył on do symulacji procesu sterowania kończyną robota. Układ sterowania opisany w punkcie 5.4 jest przedstawiony dość pobieżnie. Brak informacji o doborze wzmacnień, o modelowaniu zakłóceń, nie posuszono kwestii stabilności, omówiono wyniki zaledwie jednej symulacji. W moim odczuciu punkt 5.4 należy traktować jako przykład możliwych zastosowań modelu opracowanego w rozprawie.

Rozdział 6 nawiązuje bezpośrednio do tytułu rozprawy, jest bowiem poświęcony modelowaniu jazdy robota w terenie z nierównościami. Rozpatrywana jest wyłącznie kinematyka ruchu. Doktorant prezentuje swój wkład w metody modelowania robotów kołowo-kroczących, polegający na opracowaniu autorskiej metody adaptacji wysokości uniesienia kończyny do ukształtowania terenu, wykorzystującej model kinematyki robota oraz model punktowego kontaktu koła z podłożem, służącej utrzymywaniu zadanej wysokości i orientacji platformy w trakcie jazdy robota.

W podrozdziale 6.1 autor analizuje ruchliwość robota kołowo-kroczącego, uwzględniając kontakt trzech lub czterech kończyn z podłożem. Następnie, w kolejnym podrozdziale, po przyjęciu wektora współrzędnych opisującego konfigurację robota, doktorant przedstawia – bazujący na geometrii różniczkowej – matematyczny model punktowego styku brył. Podrozdział 6.2 kończy sformułowanie równań więzów wynikających z pozostawiania kół w kontakcie z podłożem, krępujących współrzędne opisujące robota.

W podrozdziale 6.3 znajdujemy sformułowanie obu zadań kinematyki dla analizowanego robota oraz omówienie przyjętej metody rozwiązania zadania odwrotnego. W tym punkcie pracy zabrakło nieco szerszej dyskusji dotyczącej sporej swobody w poszukiwaniu rozwiązań zadania odwrotnego (ze względu na możliwość wyboru punktu kontaktu z podłożem) – powrócę do tej kwestii w dalszej części recenzji.

Podrozdział 6.4 zawiera żmudne wyprowadzenia wzorów opisujących zależności pomiędzy prędkościami robota – po raz kolejny budowane są, stosowne do analizowanego układu, jacobiany. W punkcie 6.4.1 autor zaprezentował matematyczny opis zadanej ścieżki robota. Całość rozdziału dotyczy obiektów przestrzennych, jednak rozważania odnoszące się do ścieżki robota ograniczono do krzywej płaskiej, co znacznie upraszcza opis matematyczny, ale stanowi niepotrzebne zawężenie rozważań. W punkcie 6.5 przedstawiono funkcje opisujące kształty koła i podłoża. Sądzę, że punkt ten powinien się znaleźć bezpośrednio po podrozdziale 6.2 lub nawet wejść w jego skład.

Wyniki symulacji ruchu robota zostały opisane w podrozdziale 6.6. Autor założył, że w rzeczywistym robocie informacje o kształcie terenu pochodzą z różnych rodzajów czujników, dlatego podczas obliczeń symulacyjnych kształt podłoża traktowano jako znany. Modelowany robot poruszał się po zadanej ścieżce, a możliwości ruchowe jego kończyn były wykorzystywane do stabilizacji platformy (utrzymywania jej w poziomie). Zaprezentowane wyniki symulacji ilustrują osiągnięcie głównego celu rozprawy.

Rozdział 7 zawiera zwięzłe omówienia każdego z rozdziałów, podsumowujące uzyskane wyniki. Na zakończenie, w kilkudziesięciu akapicie, autor poddał swą pracę krytycznej ocenie i zaproponował możliwe kierunki przyszłych badań.

2. Istotność naukowa i główne osiągnięcia

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 wrocławskim.

Autor sformułował podstawowy cel badawczy dotyczący opracowania metodyki modelowania robota mobilnego o szczególnej strukturze, będącej połączeniem robota kołowego z maszyną kroczącą. Wśród celów szczegółowych odnajdujemy istotne zagadnienie syntezy strukturalnej i wymiarowej kończyn robota, zagadnienie modelowania dynamiki kończyny, a także zagadnienie modelowania kinematyki jazdy po podłożu z nierównościami. Postawione w pracy cele należy uznać za istotne naukowo. Zostały one jasno określone i należyte uzasadnione.

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

Opisane w rozprawie wyniki badań zawierają elementy nowości naukowej i wnoszą wkład w dziedzinę modelowania robotów mobilnych, w szczególności w metody modelowania układów hybrydowych – kołowo-kroczących. Za najistotniejsze nowości naukowe uważam następujące rezultaty.

- Opracowanie i wykorzystanie opartego na metodach syntezy strukturalnej mechanizmów sposobu postępowania podczas określania struktury kinematycznej kończyn robota kołowo-kroczącego.
- Zaprezentowanie nowej metody syntezy wymiarowej kończyny robota hybrydowego, a w szczególności sformułowanie autorskiej listy kryteriów optymalizacyjnych.
- Wyprowadzenie równań kinematyki i dynamiki dla wybranego typu układu kinematycznego kończyny robota kołowo-kroczącego.
- Zaproponowanie metody adaptacji wysokości uniesienia kończyny do ukształtowania terenu, wykorzystującej model kinematyki robota oraz model punktowego kontaktu koła z podłożem.

Warty odnotowania jest także zastosowany w rozprawie sposób przeprowadzania symulacji numerycznych (z wykorzystaniem pakietu do obliczeń metodą układów wielocłonowych) weryfikujących poprawność opracowanego modelu matematycznego (w postaci równań analitycznych), umożliwiając odrębne sprawdzanie poprawności wyznaczenia poszczególnych macierzy i wektorów występujących w tym modelu.

Należy także zwrócić uwagę, że osiągnięcia zaprezentowane w rozprawie były częściowo opisywane w publikacjach naukowych. Mgr inż. Przemysław Sperzyński jest współautorem kilkunastu publikacji (9 z nich jest notowanych w bazie Scopus, a 6 w Web of Science), z których 7 (w tym 1 w czasopiśmie *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*) ściśle wiąże się z tematyką doktoratu. Dorobek publikacyjny doktoranta świadczy o tym, że jego prace były konfrontowane z opinią środowiska naukowego, a on sam jest świadom konieczności rozpowszechniania wyników prowadzonych badań.

Podsumowując ocenę głównych osiągnięć i istotności naukowej rozprawy, stwierdzam, że autor w sposób twórczy wykorzystał narzędzia znane z obszarów teorii mechanizmów, optymalizacji, robotyki manipulacyjnej i mobilnej, uzyskując spójny zestaw metod obliczeniowych wspomagających proces projektowania i modelowania hybrydowych, kołowo-kroczących robotów mobilnych. Wkład naukowy autora rozprawy, polegający na doborze i dostosowaniu metod do badań wybranej klasy układów mechanicznych stanowi istotny przyczynek do stanu wiedzy w bardzo szerokim i intensywnie rozwijanym obszarze projektowania i modelowania robotów mobilnych.

3. Uwagi o edycji pracy

Rozprawa jest przejrzysto napisana i jednolicie zredagowana. Autorowi udało się połączyć szczegółowość wywodu z jego zrozumiałością. Polszczyzna rozprawy jest na ogół poprawna, jednak dosyć częste są niedociągnięcia interpunkcyjne, w kilku miejscach dałoby się również poprawić styl. Kilukrotnie (np. na str. 10, 21) niefortunnie użyto słowa kontrola zamiast słowa sterowanie. Bardzo często słowo ilość jest używane zamiast słowa liczba. Pominięcie numeracji niektórych wzorów utrudnia precyzyjne odnoszenie się do treści pracy.

Jakość materiału ilustracyjnego zasługuje na pochwałę. Rysunki są przejrzyste, ukierunkowane na uwypuklenie istotnych informacji i w znacznym stopniu ułatwiają śledzenie tekstu.

Pomyłki w tekście o znacznej objętości są oczywiście nieuniknione. Z recenzenckiego obowiązku sporządziłem krótką listę dostrzeżonych pomyłek, których – ze względu na ich nieistotność dla odbioru pracy – nie warto tu szczegółowo dyskutować. Swoje uwagi prześlę autorowi osobno.

4. Wątpliwości, zagadnienia dyskusyjne i uwagi krytyczne

Praca jest napisana zrozumiale – na ogół bez trudu można prześledzić dokonania autora. Jest jednak kilka kwestii wymagających wyjaśnień lub szerszego omówienia. Wynotowałem kilka zagadnień, które warto przedyskutować.

- [Rozdział 2] Proces podejmowania decyzji dotyczącej wyboru struktury kinematycznej bardzo trudno przedstawić w postaci algorytmu czy choćby zbioru sztywnych reguł. Wybór ma zwykle charakter subiektywny, konstruktor bierze pod uwagę wiele różnorodnych czynników. W rozprawie zostały sformułowane wymagania dotyczące projektowanej struktury kinematycznej. Zaprezentowano również 6 rozpatrywanych schematów kinematycznych. Brak jednak uzasadnienia wyboru konkretnego schematu. Nie wiadomo, jakie argumenty zadecydowały o tym, że wybrane rozwiązanie uznano za lepsze od innych rozpatrywanych wariantów. Znajdujemy jedynie informację, że po przeprowadzeniu wstępnych analiz przyjęto, iż zastosowane będzie rozwiązanie bazujące na schemacie 360A.1. Na czym zatem polegały wstępne analizy i jakie kryteria zadecydowały o wyborze?
- [Rozdział 3] Opisywane w rozdziałach 3.2.1 i 3.2.2 zadania odwrotne i proste kinematyki dotyczą nieskomplikowanego mechanizmu o strukturze wahadła podwójnego. W takim przypadku zastosowanie metody analityczno-geometrycznej i wyprowadzenie analitycznych formuł nie stanowi problemu. Gdyby jednak zdecydowano się na mechanizmy o większej liczbie członów (np. wariant pięcioczłonowy opisany w tabeli 2.1) lub na mechanizmy przestrzenne, to zapisanie analitycznych wzorów byłoby znacznie trudniejsze. Czy możliwe jest rozwiązywanie zadań kinematyki metodami numerycznymi, czy też znajomość rozwiązań analitycznych jest niezbędna dla przeprowadzenia kolejnych kroków postępowania?
- [Rozdział 3, rozdział 4] Przy przyjętym sposobie napędzania mechanizmu pokazana na rysunku 3.8b konfiguracja nie jest osobliwa. Przy ustalonej wartości kąta θ_1 , chwilową osią obrotu członu 23 jest punkt B – zmiana długości siłownika s_2 spowoduje obrót członu 23 wokół tego punktu. Osobliwość pojawi się, kiedy punkt B znajdzie się na linii wyznaczonej przez punkty C i D (będzie to drugi wariant osobliwości pokazanej na rysunku 3.8a). Warto odnotować, że konfiguracja osobliwa może się pojawić w – pominiętym w rozważaniach – łańcuchu napędowym z siłownikiem s_1 . Stanie się to, gdy pokazane na rysunku 3.6 punkty A, H i G będą współliniowe. W punkcie 4.1.3, gdzie Autor powraca do kwestii osobliwości (tym razem w sposób bardziej precyzyjny, odwołujący się do badania macierzy Jacobiego), pierwsze z równań (4.28) odpowiada właśnie konfiguracji osobliwej pierwszego napędu. Co więcej, ostatnie zdanie punktu 4.1.3 wskazuje, że konfiguracja z rysunku 3.8b nie jest osobliwa, gdyż nie obniża rzędu macierzy Jacobiego. Proszę o wypowiedź porządkującą kwestie związane z osobliwościami.

Komentarz do powyższej uwagi.

Jak wiadomo, zbliżanie się mechanizmu do konfiguracji osobliwej o charakterze położenia krańcowego (punktu zwrotnego) można wykryć poprzez śledzenie normy prędkości. W uproszczeniu: gwałtowny wzrost prędkości członów mechanizmu towarzyszący równomiernej prędkości członu napędowego świadczy o zbliżaniu się do takiej konfiguracji. W tym kontekście sformułowany w punkcie 3.3 warunek równomierności pracy mechanizmu ($dy_F/ds_1 \approx \text{const}$) pośrednio wymusza unikanie takich parametrów geometrycznych mechanizmu, przy których konfiguracja napędu s_1 zbliża się do osobliwej. A zatem, nawet jeśli problemy towarzyszące współliniowości punktów A, H i G nie są analizowane bezpośrednio, to – dzięki wspomnianemu warunkowi – w zoptymalizowanym mechanizmie nie powinny wystąpić.

- [Rozdział 3] Z opisu na stronie 52 oraz z rysunku 3.11 wynika, że jako jedno z kryteriów optymalizacyjnych wykorzystano zależność $dy_F/d\theta_1 \approx \text{const}$, a nie wskazaną wcześniej (również na str. 52) zależność $dy_F/ds_1 \approx \text{const}$. Z uwagi na zalety związane ze sterowaniem, wersja odwołująca się wprost do długości siłownika s_1 wydaje się rozsądniejsza. Proszę o wyjaśnienia.
- [Rozdział 3] Z informacji na stronach 53-55 wynika, że proces optymalizacji wymiarowej przebiegał sekwencyjnie. W pierwszym etapie (z wykorzystaniem algorytmu genetycznego) wyznaczono wartości zmiennych decyzyjnych $l_1, l_2, l_5, \theta_B, x_D, y_D$ minimalizujące funkcję celu (3.11). W kolejnym etapie minimalizowana była funkcja celu dana wzorem (3.12). Nie jest jednak jasne, które zmienne decyzyjne podlegały optymalizacji na tym etapie i jakiego algorytmu optymalizacji użyto. Z tekstu na str. 64 wynika natomiast, że w drugim etapie syntezy wymiarowej nie przeprowadzono optymalizacji pod kątem funkcji celu (3.12), a jedynie wykorzystano charakterystykę (3.6) do wyboru jednego spośród kilku rozwiązań wygenerowanych przez algorytm genetyczny. Proszę o wyjaśnienie wątpliwości związanych z wykorzystaniem funkcji celu (3.12).
- [Rozdział 4] W punkcie 4.2 omówiono sterowanie ruchem kończyny w sytuacji, gdy znany jest ruch siłowników, co odpowiada znanemu w robotyce sterowaniu we współrzędnych konfiguracyjnych. Czy przewidziano sterowanie we współrzędnych zadaniowych/kartezjańskich, kiedy dana jest trajektoria (tor i profil prędkości/przyspieszeń) środka koła?
- [Rozdział 5] Obliczenia dotyczące dynamiki kończyny prowadzone są w układzie związanym z korpusem maszyny kroczącej. Przyjęto zatem zapewne założenie, że jest to układ inercjalny. W przypadku poruszającej się maszyny założenie takie jest dalece nieoczywiste. Proszę o wyjaśnienia i komentarze.
- [Rozdział 5] W rozprawie omówiono sposób uwzględniania w równaniach ruchu siły zewnętrznej działającej na koło, zapisując odpowiednie jakobiany punktu kontaktu. Nie jest jednak jasne, skąd brany będzie wektor tej siły. Czy konieczne będzie dodanie modelu opony i gruntu? Czy niezbędne będzie jednoczesne uwzględnianie wszystkich kończyn pozostających w kontakcie? Zaprezentowane w pracy symulacje dynamiki ruchu kończyny (jeśli czegoś nie przeoczyłem) dotyczą ruchu przenoszenia, zatem – wobec braku siły kontaktu – niewiele wnoszą w omawianej kwestii. Proszę zatem o wyjaśnienia.
- [Rozdział 6] Na str. 119 pada stwierdzenie dotyczące modelowania kontaktu: „Przyjęto ograniczenie, aby zdefiniowana powierzchnia podłoża była zawsze wypukła”. To bardzo silne ograniczenie. W terenie, pomiędzy dwoma wypukłymi pagórkami zawsze znajdzie się fragment powierzchni wklęsłej. Czy nie należało również rozpatrzyć wariantu powierzchni wklęsłej, ewentualnie nakładając ograniczenie na jej krzywiznę (zakładając, że jest mniejsza niż krzywizna koła)? Rysunek 6.15 na stronie 139 pokazuje powierzchnię podłoża złożoną z obszarów wklęsłych i wypukłych. Proszę o wyjaśnienie tej sprzeczności.
- [Rozdział 6] W punkcie 6.3.1 omówiono sposób rozwiązywania zadania odwrotnego dla pojedynczej kończyny. Z kontekstu opisu wynika, że problem istnienia nieskończenie wielu rozwiązań tego zadania rozwiązano, przyjmując w sposób arbitralny niektóre niewiadome (np. wysuw koła). Czy możliwość wybierania spośród wielu rozwiązań da się spożytkować? Na przykład, można byłoby zadbać o takie ustawienie trzech kończyn względem platformy, aby usytuowanie środka masy robota względem punktów podparcia umożliwiło uniesienie czwartej kończyny. Proszę o dyskusję tej kwestii.

- [Rozdział 6] Równanie (6.49), formułowane dla każdej kończyny osobno, krępuje prędkości robota. Przy czterech kończynach w kontakcie z podłożem, po zadaniu prędkości platformy, mamy zatem do dyspozycji 12 równań wiążących 16 prędkości względnych w kończynach. W wielu przypadkach daje to możliwość wybrania jednego spośród wielu możliwych zestawów prędkości względnych. Ale istnieją też konfiguracje robota, przy których pewne prędkości zadane platformy nie dadzą się zrealizować (np. na płaskim podłożu wszystkie koła są ustawione do jazdy na wprost, a my żądamy jazdy w bok). Jak wykryć takie konfiguracje? Jak planować ruch robota, by się nie pojawiały?

Na zakończenie tej sekcji zachowałem kilka uwag i krytycznych komentarzy odnoszących się do całości pracy.

- W pracy szczegółowo przedstawiono studium wybranego przypadku, natomiast kwestia ogólności i uniwersalności zaproponowanych metod nie została należycie uwypuklona. Warto byłoby pokusić się o pewne uogólnienia, szczególnie w obszarze nowo zaproponowanych metod syntezy kinematycznej (strukturalnej i wymiarowej).
- Końcowe symulacje odnoszą się wyłącznie do kinematyki mechanizmu. Prezentowane we wcześniejszych rozdziałach rozważania dotyczące dynamiki nie są na tym etapie wykorzystywane. Nie jest jasne, czy planowane są prace zmierzające do uwzględniania w modelu całego pojazdu zjawisk dynamicznych.
- W rozprawie zaprezentowano symulacje ruchu pojedynczej kończyny oraz symulacje czterokołowej jazdy, podczas której kończyny służą adaptacji wysokości koła do kształtu podłoża. Nie modelowano jednak ruchów odpowiadających kroczeniu, co budzi pewien niedosyt (sam autor, w podsumowaniu, daje temu wyraz).

5. Podsumowanie oceny i wnioski końcowe

Recenzowana rozprawa doktorska lokuje się tematycznie w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i wnosi wkład do stanu wiedzy w obszarze projektowania i modelowania robotów mobilnych (według dawniejszej klasyfikacji należałoby pracę przypisać do dyscypliny budowa i eksploatacja maszyn). Pytania, zagadnienia dyskusyjne oraz krytyczne uwagi sformułowane w poprzednich punktach recenzji stanowią naturalną konsekwencję uważnej lektury i nie umniejszają wartości rozprawy. Autor wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Osiągnięcia omówione w punkcie 2 recenzji upoważniają go do ubiegania się o stopień doktora.

Podsumowując recenzję stwierdzam, że przedłożoną pracę oceniam **pozytywnie**. Rozprawa prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną autora w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, a jej przedmiotem jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego z obszaru projektowania oraz modelowania kinematyki i dynamiki mechanizmów. Oceniane dzieło **spełnia zatem wymagania** przewidziane dla rozpraw doktorskich w aktualnie obowiązującym prawie. Dlatego **stawiam wniosek o dopuszczenie mgra inż. Przemysława Sperzyńskiego do publicznej obrony jego rozprawy doktorskiej zatytułowanej *Modelowanie ruchu robota kołowo-kroczącego w terenie z nierównościami***.

M. Wojtyra