

dr hab. inż. Piotr Gierlak, prof. PRz
Katedra Mechaniki Stosowanej i Robotyki
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska
35-959 Rzeszów
al. Powstańców Warszawy 12
e-mail: pgierlak@prz.edu.pl
tel.: 17 865 18 54

Rzeszów, 30.10.2024

RECENZJA
rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Mateusza FIEDENIA

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Mateusza FIEDENIA, pt. „Metoda syntezy mobilnego robota do zadań inspekcyjnych z uwzględnieniem systemów wizyjnych”. Recenzję opracowano na podstawie:

- uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej, nr 3/01/RDND07/2024-2028, z dn. 30 września 2024 dot. wyznaczenia mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mateusza Fiedenia,
- pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej, prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego z dn. 3.10.2024, znak: W10/RDND07/72/2024.

1. Ocena tematyki pracy doktorskiej

Badania dotyczące robotów mobilnych od lat cieszą się niesłabnącym zainteresowaniem w środowisku naukowym oraz przemysłowym. Mobilność robotów jest tą cechą, która otwiera wiele obszarów zastosowań zarówno w zadaniach realizowanych autonomicznie jak i we współpracy z ludźmi. Szczególne miejsce wśród robotów mobilnych zajmują takie, które ze względu na konstrukcję układu jezdnego i odpowiednio realizowanego sterowania, mogą realizować taki ruch, w którym realizacja ruchu wzdłuż dowolnego kierunku jest niezależna od orientacji robota i na odwrót. Takie roboty należą do grupy robotów omnikierunkowych, wśród których wyróżnia się dodatkowo roboty omnikołowe i omnigąsienicowe. Zarówno badania naukowe jak i zastosowania robotów omnikołowych są już bardzo zaawansowane, czego nie można powiedzieć o robotach omnigąsienicowych, gdzie wciąż jest jeszcze wiele otwartych pól badawczych.

Praca doktorska dotyczy syntezy mobilnego robota omnigąsienicowego przeznaczonego do zadań inspekcyjnych. Przedmiotem prac przedstawionych w rozprawie były: analiza kinematyki, badanie oporów ruchu rolek tocznych, konstrukcja robota, badania ruchu robota w warunkach laboratoryjnych i terenowych oraz badania systemu wizyjnego. Tematyka ta jest warta podjęcia wysiłków badawczych choćby ze względu na zalety pojazdów gąsienicowych. W przypadku zadań inspekcyjnych korzyści płynące z zastosowania podwozia gąsienicowego mogą decydować o możliwości wykorzystania robota do takich typów zadań. Dlatego tematykę pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Mateusza Fiedenia oceniam jako aktualną i ważną zarówno w kontekście naukowym jak i użytkowym.



2. Treść rozprawy i jej kompozycja

Przedstawiona praca składa się ze streszczeń w języku polskim i angielskim, spisu treści, spisu oznaczeń, dziesięciu rozdziałów oraz bibliografii. Praca liczy 154 strony.

W rozdziale 1 zatytułowanym *Wstęp* Doktorant dokonał przeglądu rozwiązań w zakresie robotów mobilnych z uwzględnieniem podziału na: obszary zastosowań robotów mobilnych, rodzaje napędu, rodzaje podwozi a także wyróżnił gąsienicowe pojazdy omnikierunkowe oraz dokonał przeglądu ich napędów. Na podstawie analizy obecnego stanu wiedzy i techniki sformułował cel pracy doktorskiej, który brzmi: *opracowanie metod syntezy i analizy robota mobilnego wyposażonego w gąsienice omnikierunkowe oraz metody aktywnej kompensacji kierunku ruchu*. W kontekście aktualnego stanu wiedzy i techniki oceniam taki cel pracy jako odpowiednio sformułowany. Następnie wymieniono cele pośrednie, których osiągnięcie miało służyć osiągnięciu głównego celu pracy. W tym miejscu Doktorant wielokrotnie nadużył określenia metoda. Bowiem w opisie celów pośrednich znajdują się sformułowania: *opracowanie metody analizy kinematyki, opracowanie metod projektowania pojazdów, opracowanie metody budowy modelu obliczeniowego, opracowanie metody kompensacji zakrzywienia trajektorii ruchu*. Natomiast w dalszej części pracy nie ma informacji na temat tych metod. Żaden z rozdziałów, w którym opisano badania związane z celami pośrednimi, nie został opatrzony opisem sposobu postępowania prowadzącego do rozwiązania danego problemu oraz osiągnięcia zdefiniowanego celu, co nazywamy metodą. Pomijając jednak niefortunne użycie wyrażenia metoda w opisie celów pośrednich można stwierdzić, że czynności przewidziane do wykonania i opisane w celach pośrednich składają się na metodę opisaną w celu głównym oraz tytule rozprawy, a która dotyczy syntezy robota mobilnego wyposażonego w gąsienice omnikierunkowe. Reasumując stwierdzam, że cel pracy został sformułowany poprawnie a cele pośrednie, pomimo przedstawionych niefortunnych wyrażen, w swej istocie służą osiągnięciu celu głównego.

Rozdział 2 zatytułowany *Budowa pojazdów omniągąsienicowych* dotyczy głównie budowy gąsienic oraz układów bieżnych pojazdów. W końcowym fragmencie rozdziału znajduje się opis modelu koncepcyjnego demonstratora robota opracowany przez Doktoranta, który charakteryzuje się układem gąsienic równoległych całkowicie zachodzących. Rozdział jest dość krótki i mógłby stanowić jeden z podrozdziałów w rozdziale pierwszym.

W rozdziale 3 zatytułowanym *Metoda analizy kinematycznej układu jazdy pojazdu omniągąsienicowego* zamieszczono opis kinematyki robota. W podrozdziale 3.1. przedstawiono zależności pomiędzy ruchem gąsienic robota a ruchem jego korpusu. Rozdział nie zawiera jednak opisu ruchu płaskiego, który jest możliwy do realizacji przez analizowanego robota. Brakuje jasnego sformułowania wszystkich założeń przyjętych w analizie kinematyki. Doktorant stwierdza jedynie, że korpus porusza się ruchem postępowym, co każe domyślać się, że możliwość obrotu korpusu została pominięta w opisie analitycznym i przedmiotem dalszych analiz jest jedynie ruch postępowy korpusu robota. I rzeczywiście w dalszej części rozdziału podane zostały zależności kinematyczne występujące w ruchu postępowym, a następnie rozważone zostały różne warianty ruchu postępowego przy założonych różnych kierunkach wektora prędkości korpusu względem osi wzdłużnej robota. W rozdziale 3 w podrozdziale 3.2 zamieszczono również analizę ruchu przeprowadzoną w środowisku Hexagon ADAMS.

Rozdział 4 zatytułowany *Budowa robota OMP2024_1* zawiera założenia projektowe przyjęte przed zaprojektowaniem i zbudowaniem demonstratora robota omniągąsienicowego. Opisano w tym rozdziale także konstrukcję mechaniczną wykonaną przez Doktoranta techniką druku 3D, sposób szacowania oporów ruchu, dobór silników napędowych oraz wybraną metodę sterowania, czyli regulację PID, realizowaną z zastosowaniem mikrokontrolera.

Rozdział 5 zatytułowany *Badania robota OMP2024_1* zawiera opis badań przeprowadzonych na demonstracyjnym robocie omniągąsienicowym. Opisano zagadnienie zakrzywienia trajektorii ruchu

oraz stanowisko pomiarowe skonstruowane w celu badania tego zjawiska. Wyjaśniono działanie systemu wizyjnego, który jest głównym elementem stanowiska pomiarowego. Następnie opisano badania dotyczące ruchu robota po dwóch wybranych torach. Otrzymane niezadowalające wyniki badań skłoniły Doktoranta do opracowania algorytmu korekty kierunku ruchu robota. Algorytm korekty ma charakter sterowania w torze otwartym, tzn. nie uwzględnia aktualnego stanu robota. Jak słusznie zauważył sam Doktorant, takie podejście ma ograniczone zastosowanie i nie będzie skuteczne podczas ruchu w trudnym środowisku o zmiennej lub nieznannej przyczepności.

Rozdział 6 zatytułowany *Badanie oporów ruchu rolki tocznej* zawiera opis badań przeprowadzonych na skonstruowanym przez Doktoranta stanowisku pomiarowym dostosowanym do wielowariantowych badań oporów ruchu rolek tocznych. Stanowisko umożliwia badanie wpływu prędkości, obciążenia, kąta orientacji i kształtu rolki oraz rodzaju podłoża na siły oporu ruchu na dwóch kierunkach. Metodologię badań przedstawionych w rozdziale 6 oceniam jako poprawną, również wnioski wyciągnięte z wyników pomiarów uważam za słuszne. Rozdział 6 oceniam jako jeden z bardziej wartościowych rozdziałów recenzowanej pracy.

W **Rozdziale 7** zatytułowanym *Budowa robota OMP2024_2* Doktorant przedstawił sposób projektowania robota omnigąsienicowego. Przedstawił założenia konstrukcyjne, opis konstrukcji mechanicznej ze szczególnym uwzględnieniem omnigąsienic, oraz układ napędowy robota. W projektowaniu robota OMP2024_2 Doktorant wykorzystał wiedzę uzyskaną podczas wcześniej przeprowadzonych badań robota OMP2024_1 oraz badań rolki tocznej opisanych w rozdziale 6. Niewątpliwie wcześniejsze badania wydatnie przyczyniły się do zrealizowania celu jakim było zbudowanie docelowego demonstratora robota omnigąsienicowego. Niemniej jednak czytając rozdział 7 trudno oprzeć się wrażeniu, że opisy niektórych działań są powierzchowne. Np. w rozdziale nie zawarto żadnych informacji na temat doboru docisków sprężynowych kół jezdnych, a przecież odpowiedni dobór tych elementów jest kluczowy ze względu na działanie modułów gąsienicowych. Rozdział na pewno zyskałby na zamieszczeniu w nim wyników analiz, symulacji czy badań eksperymentalnych w tym zakresie. W końcowej części rozdziału opisano system sterowania oraz algorytm kompensacji kierunku jazdy, który w rzeczywistości jest sterowaniem orientacją robota. Mając na uwadze wcześniejsze wyniki badań i wypływające z nich wnioski, Doktorant opracował aktywną wersję algorytmu kompensacji kierunku jazdy, bazującą na sprzężeniu zwrotnym od orientacji obiektu sterowania.

Rozdział 8 zatytułowany *Badania robota OMP2024_2* zawiera opis badań przeprowadzonych na drugiej wersji demonstracyjnego robota omnigąsienicowego. Opisano stanowisko pomiarowe skonstruowane w celu badania ruchu robota wyposażone w system wizyjny. Następnie zamieszczono analizę dokładności układu pomiarowego. W dalszej części rozdziału opisano badania dotyczące ruchu robota bez kompensacji kierunku jazdy oraz z aktywną kompensacją kierunku jazdy zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i w warunkach terenowych na podłożu z kostki brukowej oraz podłożu piaszczystym. Otrzymane wyniki badań zostały opatrzone komentarzem Doktoranta oraz posłużyły do wyciągnięcia wniosków, które oceniam jako poprawne.

Rozdział 9 zatytułowany *System wizyjny robota OMP2024_2* zawiera opis zastosowania systemu wizyjnego, który został wykorzystany do realizacji ruchu z różnymi wariantami zachowań robota w przypadku wykrycia przeszkód, w tym ludzi. W zależności od stopnia zaawansowania algorytmu robot zatrzymuje się w przypadku wykrycia przeszkody lub ją omija. W przypadku wykrycia człowieka, każdorazowo robot zatrzymuje się ze względów bezpieczeństwa. Przedstawione w dysertacji opisy zastosowania systemu wizyjnego prezentują się w mojej opinii jako wstępne badania służące zapewnieniu jak największej autonomii robota.

Rozdział 10 zatytułowany *Podsumowanie i wnioski* zawiera syntetyczny opis najważniejszych osiągnięć Doktoranta oraz przyszłych prac.

Bibliografia zawiera wykaz 107 publikacji naukowych oraz 48 źródeł internetowych.

3. Oryginalne osiągnięcia

Jak stwierdziłem na wstępie recenzji, przedstawiona do oceny dysertacja podejmuje ważny i interesujący badawczo problem. Za oryginalne elementy pracy uważam:

- sformułowanie opisu kinematyki robota omnigąsienicowego,
- przeprowadzenie badań oporów ruchu rolki tocznej,
- budowę robota omnigąsienicowego z uwzględnieniem konstrukcji mechanicznej, układów napędowych i systemu sterowania wraz z systemem wizyjnym,
- przeprowadzenie badań laboratoryjnych i terenowych dotyczących ruchu robota omnigąsienicowego.

4. Uwagi krytyczne i szczegółowe

Uwagi jakie nasuwają się po przeczytaniu pracy mają charakter zarówno merytoryczny jak i redakcyjny.

- a) W podrozdziale 1.3.1 Doktorant sformułował następujące zdanie: „Rolki toczne (...) to nienapędzane, swobodne walce” myląc bryły swobodne z członami biernymi czyli nienapędzanymi. Podobne niepoprawne sformułowanie „swobodne rolki” występuje jeszcze wielokrotnie w kolejnych rozdziałach pracy.
- b) W podrozdziale 1.3.4 Doktorant sformułował następujące zdanie: „Kula, dzięki swojemu kształtowi może bez oporów przetaczać się w dowolnym kierunku, (...)”. Stwierdzenie jest nieprawdziwe, ponieważ przy toczeniu się kuli występują opory toczenia wynikające z deformacji kuli i podłoża.
- c) W rozdziale 2 Doktorant napisał następujące zdania. „Każdy układ bieżny gąsienicy, oznaczony jako b_n , posiada indywidualny napęd i układ sterowania. Oznacza to, że każda gąsienica może obracać się w dowolnym kierunku i z dowolną prędkością.” Nie jest jednak prawdą, że każda gąsienica może obracać się w dowolnym kierunku z dowolną prędkością. Indywidualny napęd i układ sterowania pozwala jedynie wykonywać ruchy niezależnie od pozostałych gąsienic.
- d) Równanie (3.2) opisujące zależność między prędkością kątową koła czynnego układu bieżnego a prędkością liniową v_n gąsienicy jest niepoprawne. Przełożenie i_{MBn} powinno być podniesione do potęgi „-1”.
- e) Robot omnigąsienicowy na płaszczyźnie może poruszać się ruchem płaskim. Jednak w rozdziale 3 podane zostały jedynie zależności kinematyczne występujące w ruchu postępowym, a pominięto drugą składową ruchu płaskiego, czyli ruch obrotowy. Znacząco zubożyło to opis kinematyki w stosunku do możliwości robota. Pełen opis kinematyki robota ułatwiłby sformułowanie algorytmów korekcji kierunku ruchu.
- f) W rozdziale 3 dotyczącym kinematyki, w podrozdziale 3.2 zamieszczono analizę ruchu przeprowadzoną w środowisku Hexagon ADAMS. W badaniach symulacyjnych uwzględniono szereg współczynników, które są związane z dynamicznymi właściwościami układu i w rzeczywistości dokonano symulacji dynamiki układu. Niejasna jest zatem celowość takich badań i wartość poznawcza wyników takiej symulacji w kontekście analizy kinematycznej. Ponadto wątpliwość budzi ruchliwość zamodelowanego układu, która wynosi 14.
- g) W rozdziale 4 znajduje się zdanie: „Wykazano, że maksymalne opory wewnętrzne generowane podczas ruchu poprzecznego do osi głównej robota, wynosiły $F^T=13N$.” Opory ruchu określone w drodze opisanego w pracy eksperymentu to nie tylko opory wewnętrzne ale suma oporów wewnętrznych i zewnętrznych wynikających z kontaktu podłoża z rolkami, których opony wykonano z tworzywa TPU, które jest materiałem miękkim. Podobne mylne stwierdzenie znajduje się w rozdziale 7 na str. 104.

- h) Powoływanie się na równania (3.23) i (3.24) w celu wyznaczenia prędkości gąsienic, na stronie 76, jest niejasne.
- i) Na stronie 79 jest podana informacja, że przeprowadzono analizę korelacji. Z treści pracy nie wynika jednak to, jakie wielkości zostały poddane analizie korelacji.
- j) Zaproponowany w rozdziale 5 algorytm statycznej korekcji kierunku ruchu jest zgrubny. Przy jego sformułowaniu nie uwzględniono równań kinematyki zawierających pełny opis ruchu płaskiego robota, który składa się z ruchu postępowego i obrotowego. Nie uwzględniono również różnej odległości gąsienic, należących do poszczególnych modułów, od osi głównej robota. Konsekwencją tego jest fakt, że prędkość korekcji dana równaniem (5.8) jest taka sama dla wszystkich gąsienic, a powinna mieć różne wartości dla różnych gąsienic. Z powodu nieuwzględnienia pełnych równań kinematyki, pochodzenie równań od (5.9) do (5.12) jest niejasne, prawdopodobnie uzyskano je empirycznie. Ponadto wątpliwość budzi zastosowanie równania (5.8) do wyznaczenia prędkości korekcji, ponieważ występująca w tym równaniu prędkość ω_R jest prędkością kątową, natomiast do obliczeń przyjęto wartość prędkości w jednostkach stopień/sek. Dodatkowo podstawienie do równania (5.8) przyjętych przez Doktoranta wartości zarówno dla poprawnych jak i niepoprawnych jednostek prędkości ω_R , nie daje zamieszczonych w tekście pracy wyników, czyli wartości prędkości korekty. Poddaje to w wątpliwość rzetelność albo badań albo ich opisu zamieszczonego w podrozdziale 5.4.
- k) W rozdziale 7 moje olbrzymie wątpliwości budzi ekstrapolowanie wyników opisanych w rozdziale 6 uzyskanych dla rolki typu A przy bardzo małych obciążeniach na przypadek rolki typu D pracującej przy trzykrotnie większym obciążeniu. Nie ma gwarancji, że zależności pomiędzy obciążeniem, kształtem rolki i oporami ruchu mają charakter liniowy. Nie jest wiadome z jakich obliczeń wynikają wartości momentów M^k i M^c , na podstawie których powinien być dobrany silnik napędowy, ponieważ nie zamieszczono ich w pracy. Następnie przedstawione wartości momentów zignorowano przyjmując ponad połowę mniejszą wartość momentu jakim powinien charakteryzować się silnik napędowy stwierdzając, że warunki, dla których przeprowadzono wcześniejsze obliczenia są skrajne i w rzeczywistości nie wystąpią. Taki opis postępowania nie może być nazwany metodą.
- l) W dysertacji nie ma informacji na temat przyczyn zjawiska odchylenia trajektorii ruchu pojazdu omnigąsienicowego od zaplanowanej trajektorii, choć badanie odchylenia trajektorii było jednym z głównych podjętych problemów badawczych.
- m) Praca zawiera dużą liczbę błędów o mniejszym znaczeniu merytorycznym. W pracy występują błędy interpunkcyjne, stylistyczne, gramatyczne, rusycyzmy, wyrażenia potoczne i bardzo liczne błędy literowe. Doktorant nagminnie używał wyrazu ilość zamiast liczba w przypadkach, w których chodzi o rzeczowniki policzalne jak *roboty, elementy, koła, przeszkody, piksele, komponenty, punkty, rolki, ogniwa*. Szczególnie rażąco jest używanie wyrazu ilość w równaniach określających ruchliwość w odniesieniu do członów i par kinematycznych. Doktorant powinien użyć określeń liczba członów i liczba par kinematycznych. W tekście pracy niejednokrotnie brakuje pojedynczych wyrazów w zdaniach lub występują wyrazy niepotrzebne. Praca jest napisana w języku polskim, ale opisy na wielu rysunkach są w języku angielskim. W podpisie rysunku 1.24 brak odniesień do części (b) i (d). Brakuje równania (3.24), na które Doktorant kilkakrotnie powołuje się w tekście pracy. Odwołanie w tekście do rysunku 1.25 jest niepoprawne. Równanie więzów w rozdziale 3 nie ma numeru. Na stronie 67 Doktorant omyłkowo użył określenia prędkość *obrotowa* zamiast prędkość *kątowa*. Dwukrotnie na stronie 76 i dwukrotnie na stronie 82 prędkość gąsienicy oznaczono jako q_n zamiast \dot{q}_n . Podpis pod rys. 6.3 jest niepoprawny. Przedstawione na nim stanowisko nie służy do pomiaru rolek tocznych, lecz do pomiaru sił. Wyniki zamieszczone na rys. 8.6 zostały

niepoprawnie opisane. Wymienione w niniejszym podpunkcie liczne błędy utrudniają lekturę pracy ale nie czynią jej niezrozumiałą i nie zaniżają jej wartości merytorycznej.

5. Wniosek końcowy

Pomimo pewnych braków wskazanych w recenzji, moja ogólna ocena pracy doktorskiej jest dobra. Doktorant zrealizował postawiony w pracy cel główny. Dostrzegalny brak precyzji w wyrażaniu myśli i występujące nieściśle sformułowania, nie umniejszają istotnej wartości naukowej pracy polegającej na podjęciu próby i rozwiązania problemu syntezy robota omniągąsienicowego, co jest zagadnieniem wielowymiarowym. Rozprawa doktorska zawiera oryginalne osiągnięcia oraz prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Ogólny sposób prowadzenia badań opisany w dysertacji pozwala mi jednoznacznie stwierdzić, że Doktorant opanował umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, tzn. formułowania problemów badawczych i ich naukowego rozwiązywania.

Tym samym stwierdzam, że Pan mgr inż. Mateusz Fiedeń wykazał się niezbędnym zasobem wiedzy z zakresu inżynierii mechanicznej, a recenzowana praca mieści się tematycznie w obszarze dyscypliny naukowej „Inżynieria mechaniczna” i spełnia warunki stawiane przez ustawę „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. 2023, poz. 742 z póź. zm.). Tym samym stawiam wniosek o dopuszczenie Doktoranta, p. mgr. inż. Mateusza Fiedenia do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Piotr Gierlach