

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra inż. Piotra Burzyńskiego

zatytułowanej

Zastosowanie D-kształtnej nogi w robotach typu RHex - modelowanie przemieszczenia

Niniejsza opinia została opracowana w związku z powołaniem mnie przez Radę Naukową Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej na recenzenta rozprawy mgra inż. Piotra Burzyńskiego.

1. Zawartość rozprawy

Rozprawa doktorska mgra inż. Piotra Burzyńskiego, zatytułowana ***Zastosowanie D-kształtnej nogi w robotach typu RHex - modelowanie przemieszczenia***, została opublikowana na Politechnice Białostockiej w 2025 roku. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. Ewa Pawłuszewicz.

Rozprawa jest napisana w języku polskim. Dzieło liczy 159 stron, w tym 125 stron tekstu zasadniczego, poprzedzonego spisem treści, streszczeniem, abstraktem w języku angielskim i spisem oznaczeń. Po tekście zasadniczym rozprawy umieszczono wykaz literatury, spis rysunków i spis tabel. Główna część rozprawy zawiera 9 rozdziałów, bibliografia liczy 169 pozycji uzupełnionych o 9 źródeł internetowych. **Struktura dzieła jest przejrzysta, logicznie uporządkowana i typowa dla tego rodzaju opracowań.**

W rozdziale 1 (*Wprowadzenie*) autor bardzo zwięźle odnosi się do historii, aktualnego stanu i roli robotyki mobilnej, po czym skrótowo omawia zawartość kolejnych rozdziałów rozprawy.

W rozdziale 2 (*Przegląd typów robotów mobilnych oraz ich właściwości*) na przestrzeni 16 stron zaprezentowane zostały – w sposób systematyczny – opisywane w literaturze przedmiotu różne rodzaje robotów kroczących. Autor rozpoczął od robotów operujących w środowisku lądowym, omówił także diagramy chodu. Dalsze części rozdziału dotyczą robotów działających w środowisku wodnym oraz robotów hybrydowych, operujących w różnych środowiskach. Autor przedstawił liczne przykłady robotów, wykorzystując ponad 70 pozycji literaturowych.

W rozdziale 3 (*Roboty typu RHex*) autor omawia konkretną klasę robotów, która stała się obiektem jego badań. W pierwszych dwóch punktach przedstawione są cechy charakterystyczne i opis konstrukcji robota RHex. W dość rozbudowanym i wielowątkowym punkcie 3.3 autor przedstawia zaczerpnięty z literatury model sił działających na robota i jego nogi, a następnie wymienia kilka dostępnych sposobów modelowania dynamiki robota. Kolejne strony poświęcone są analizie kinematyki kroczenia robota po lądzie. Punkt 3.4 zawiera omówienie cech konstrukcyjnych nóg robota, które umożliwiają pracę w środowisku wodnym i lądowym. W punkcie 3.5 autor przedstawił uproszczony model sił hydrodynamicznych działających na ciało poruszające się w cieczy ruchem

postępowym, a następnie uproszczony model sił działających na płetwę wykonującą oscylacje. Punkt 3.6 zawiera elementarne informacje na temat regulatora PID, zakończone wzmianką, że znane są lepsze niż oparte o sam regulator PID metody sterowania.

W rozdziale 4 (*Hipotezy i zadania badawcze*) autor określa cel pracy – opracowanie modyfikacji robota typu RHex oraz wykorzystywanych w nim metod sterowania, aby umożliwić operowanie w zmiennym środowisku wodno-lądowym – a następnie formułuje trzy hipotezy badawcze i planuje skorelowane z nimi zadania.

W rozdziale 5 (*Robot FLHex*) czytelnik odnajdzie informacje o autorskich modyfikacjach kończyn robota RHex, polegających na wyposażeniu nóg w uchylne płetwy umożliwiające napędzanie robota poruszającego się w zbiorniku wodnym. W kolejnych punktach rozdziału autor przedstawia i omawia wykresy ilustrujące wyniki pomiarów sił hydrodynamicznych, a następnie buduje model matematyczny umożliwiający obliczenie siły ciągu generowanej przez zanurzone w wodzie nogi robota. Punkt 5.3 zawiera opis konstrukcji robota i jego układu sterowania. Eksperymentalną weryfikację możliwości ruchowych robota na lądzie i w wodzie omówiono w punkcie 5.4.

W rozdziale 6 (*Model przemieszczania się robota FLHex po płaskim terenie*) autor opisał kinematykę kroczenia na wprost po płaskim terenie, najpierw dla pojedynczej nogi, potem dla tripoda tworzonego przez trzy pracujące synchronicznie kończyny. Opis rozpoczyna się od analizy parametrów określających geometrię nóg, w tym tzw. kąta wydłużenia nogi. W dalszej części zaprezentowane są równania opisujące pełzanie robota, a także szczegółowa analiza punktów przełączania podporu z nogi tylnej na przednią w zależności od wybranych parametrów geometrycznych nóg. Przeanalizowano poszczególne fazy ruchu, którym odpowiada ruch środka korpusu po cykloidzie lub po łuku okręgu. W części dotyczącej ruchu tripodów omówiono sekwencje ruchu charakteryzujące się różnymi prędkościami obrotowymi nóg w fazie przenoszenia i fazie podparcia. Rozdział kończy opis eksperymentów polegających na realizacji zaplanowanego kroczenia robota i porównaniu trajektorii rzeczywistej z trajektorią zadaną. Opisowi eksperymentów towarzyszy analiza dotycząca doboru parametrów konstrukcyjnych w taki sposób, by zmniejszyć problemy z gładkością ruchu obserwowane w momencie przełączania podparcia między tripodami.

W rozdziale 7 (*Sposób regulacji przemieszczenia kątownego D-kształtnej nogi robota FLHex*) autor opisał i skomentował prace dotyczące regulatora sterującego ruchem nogi robota. Rozpoczął od zastosowania algorytmu PID w układzie regulacji nadążnej, a następnie – wobec niesatysfakcjonujących rezultatów – zaproponował modyfikację działania regulatora PID poprzez wprowadzenie niejednorodnego próbkowania, co również nie dało oczekiwanych efektów. W kolejnym wariantcie układu sterowania autor wykorzystał regulator PID niecałkowitego rzędu, który został zaimplementowany w układzie sterowania robota i przetestowany na stanowisku badawczym. Do porównywania efektów regulacji autor wykorzystywał dwa wskaźniki jakości: ISE (mierzący dokładność odwzorowania zadanego ruchu) oraz IEC (mierzący zużywaną w procesie sterowania energię).

W rozdziale 8 (*Podsumowanie*) autor przypomina zaprezentowane w rozprawie osiągnięcia i wskazuje, że postawione zadania badawcze zostały zrealizowane.

W rozdziale 9 (*Kierunki dalszych prac*) omówione są cztery propozycje dalszych badań, stanowiących bezpośrednią kontynuację tematów podjętych w rozprawie.

2. Omówienie i ocena elementów rozprawy

W tym punkcie recenzji odnoszę się do wybranych, moim zdaniem najistotniejszych, elementów rozprawy.

2.1. Przegląd stanu wiedzy

Przegląd literatury odnajdujemy przede wszystkim w rozdziałach 2 i 3. W miarę potrzeb jest on uzupełniany w kolejnych rozdziałach.

W rozdziale 2 omówiono liczne konstrukcje robotów mobilnych – literatura jest dobrze dobrana, widać wyraźnie, że autor dogłębnie przestudiował publikacje dotyczące tematyki doktoratu. Cytowane prace pochodzą z różnych lat, obrazując różne etapy rozwoju maszyn krocących, nie brak wśród nich prac najnowszych, prezentujących aktualny stan wiedzy w analizowanej dziedzinie. Część przeglądu stanu wiedzy poświęcona przedstawieniu konstrukcji robotów mobilnych nie budzi zastrzeżeń.

W rozdziale 3 zagadnienia modelowania kinematyki i dynamiki robotów krocących, obliczenia hydrodynamiczne, jak również problemy sterowania, autor zdecydował się przedstawić wyłącznie w odniesieniu do robotów klasy RHex. W efekcie znaczna część rozdziału to w istocie dość szczegółowe omówienie wyników przedstawionych w zaledwie kilku wąsko ukierunkowanych pracach [A27, A108, A110]. Zabrakło szerszego spojrzenia na zagadnienia modelowania kinematyki i dynamiki mechanizmów i robotów krocących (np. zupełnie pominięto modelowanie kontaktu i tarcia między stopą a podłożem) czy też obliczeń odnoszących się do obiektów pływających. W części dotyczącej zagadnień sterowania odnajdujemy niepotrzebnie obszerny opis powszechnie znanego regulatora PID, natomiast inne metody sterowania są niemal zupełnie przemilczane. Zbiór prac cytowanych w rozdziale 3 to kombinacja dzieł starszych i niedawno wydanych, co należy uznać za dobry wybór. Podstawowe zastrzeżenie do tej części przeglądu dotyczy przesadnego zawężenia omawianych tematów.

Przegląd stanu wiedzy wskazuje na dobrą orientację autora w kwestiach związanych z tematyką rozprawy. Biorąc pod uwagę wskazane zalety i wady, **przegląd stanu wiedzy należy uznać za wystarczający**, choć niepozbawiony mankamentów.

2.2. Cel pracy

Cel pracy badawczej mgr inż. Piotra Burzyńskiego, sformułowany w rozdziale 4, dotyczył opracowania modyfikacji konstrukcyjnych robota typu RHex oraz wykorzystywanych w nim metod sterowania, aby umożliwić operowanie w zmiennym środowisku wodno-lądowym. Sformułowane w ślad za nim zadania badawcze wymagały przeprowadzenia prac o charakterze teoretycznym, jak również wykonania eksperymentów i pomiarów, miały zatem istotny **komponent naukowy**. Od strony technicznej niezbędna była znajomość warsztatu inżyniera, w tym umiejętność budowania systemów robotycznych oraz biegłość w posługiwaniu się oprogramowaniem inżynierskim. Realizacja postawionego celu wymagała **wszechstronnych kompetencji**.

2.3. Zastosowane metody badawcze

Modelowanie matematyczne i symulacja komputerowa w połączeniu z eksperymentami stanowią główne metody badawcze wykorzystane podczas przygotowywania doktoratu. W pracach nad rozprawą **autor zastosował zatem cały wachlarz metod badawczych typowych dla nauk**

inżynieryjno-technicznych. Budując robota kroczącego oraz stanowisko pomiarowe, wykazał się także kompetencjami inżynierskimi.

Do obliczania sił hydrodynamicznych autor zastosował uproszczony model, nadający się do zgrubnych oszacowań. Wyniki obliczeń z wykorzystaniem modelu zostały porównane z wynikami pomiarów wykonanych na stanowisku badawczym. Do pewnych niejasności, wątpliwości i niekiedy zbyt skąpych informacji dotyczących modelu oraz jego eksperymentalnej weryfikacji odnoszę się w dalszych częściach recenzji. Opracowanie i zbadanie modelu poświadczają ogólną **wiedzę autora w dyscyplinie inżynieria mechaniczna**, wykraczającą poza zakres dotyczący klasycznej robotyki. Nie jest jednak jasne, do czego (i na jakim etapie prac) opracowany model został wykorzystany. Nie jest on bowiem używany w procesie sterowania robotem, a decyzje konstrukcyjne (jak się dowiadujemy w rozdziale 5.3) zostały podjęte na bazie danych literaturowych.

Model przemieszczania się robota po lądzie bazuje na równaniach opisujących geometrię nóg robota (ze względu na przyjęte założenia, wystarczająca okazała się geometria płaska). Wyprowadzone równania zostały wykorzystane do opracowania modelu symulacyjnego sporządzonego w środowisku Matlab. Autor wykazał się **biegłością w budowaniu oraz analizie modeli** matematycznych i symulacyjnych kinematyki robotów kroczących klasy RHex. Opracowany model pozwolił na przebadanie istotnych właściwości robota i dobór kluczowych parametrów geometrycznych (do kilku niejasnych bądź dyskusyjnych kwestii odnoszę się w dalszych częściach recenzji). Spory niedosyt budzi jednak pominięcie ruchów innych niż kroczenie na wprost, a także rezygnacja z analizy zjawisk dynamicznych. Istotnym mankamentem opracowanego modelu jest zatem stosunkowo wąski zakres jego zastosowań. Należy jednak podkreślić, że **model matematyczny kinematyki robota został opracowany z użyciem właściwie dobranych metod. Poprawność jego działania** (w granicach wyznaczonych przez przyjęte założenia upraszczające) **nie budzi zastrzeżeń.**

Do sterowania pozycją nogi robota autor zastosował algorytm regulacji nadążnej z wykorzystaniem klasycznego regulatora PID oraz jego wariantów. W teoretycznych i eksperymentalnych pracach dotyczących sterownika napędzanej osi **autor zaprezentował wiedzę i kompetencje w obszarze projektowania, budowania i testowania układów sterowania.** Do pewnych wątpliwości lub niejasności dotyczących wyboru metody sterowania oraz wykorzystywanych metod strojenia regulatorów odnoszę się w dalszych częściach recenzji.

Ważnymi elementami ocenianej rozprawy są jej praktyczne aspekty – zbudowanie prototypu robota oraz badania eksperymentalne przeprowadzane na różnych etapach prac. Autor udowodnił swoją **sprawność w szerokim zakresie działań o charakterze inżynierskim, a także umiejętność planowania i przeprowadzania eksperymentów.** Niestety, opis stanowisk badawczych i szczegółów przeprowadzonych pomiarów jest zazwyczaj bardzo oszczędny w słowach, a w skrajnym przypadku całkiem pominięty, przez co istotne walory pracy nie są należycie wyeksponowane, a ocena części rezultatów jest mocno utrudniona.

Podsumowując ten punkt należy stwierdzić, że **dobór narzędzi badawczych oraz sposób ich wykorzystania w rozprawie był poprawny i** – na poziomie ogólnym – **nie budzi istotnych wątpliwości.** Do pewnych wątpliwości na poziomie szczegółów odnoszę się w dalszej części recenzji.

2.4. Rezultaty prac

Zaplanowane i przeprowadzone prace należy uznać za istotne, szczególnie ze względu na możliwość ich wykorzystania w mobilnych robotach wodno-lądowych. Opisane w rozprawie **wyniki badań zawierają elementy nowości i wnoszą wkład w stan techniki w obszarze inżynierii mechanicznej**, w szczególności w zagadnienia analizy i projektowania układów napędowych maszyn kroczących. Za

najistotniejsze uważam następujące rezultaty.

- Innowacyjne wykorzystanie mechanizmu uchylnej płetwy w układzie napędowym robota kroczącego klasy RHex, skutkujące uzyskaniem pasywnego amorfizmu nóg robota, ułatwiającego działanie w zmiennym – wodnym lub lądowym – środowisku.
- Opracowanie modelu matematycznego oraz modelu symulacyjnego kinematyki kroczenia robota klasy HReX, umożliwiającego analizę zaplanowanego chodu i dobór kluczowych parametrów konstrukcyjnych nóg.
- Przeprowadzenie testów eksperymentalnych sprawdzających spełnienie założeń funkcjonalnych robota pracującego w dwóch środowiskach oraz weryfikujących wyniki symulacyjne.

Warto dodać, że niektóre badania i rezultaty zaprezentowane w rozprawie zostały **opublikowane w czasopismach naukowych** lub materiałach konferencyjnych. W cytowanej literaturze odnajdujemy **cztery artykuły** napisane z udziałem autora rozprawy, ściśle powiązane z tematyką doktoratu, w tym dwa artykuły w czasopismach.

3. Uwagi o edycji pracy

Rozprawa jest przejrzysto napisana oraz jednolicie i schludnie zredagowana. Polszczyzna rozprawy jest bardzo dobra, autor ma dar jasnego przedstawiania myśli. Pomyłki gramatyczne lub interpunkcyjne są niezwykle rzadkie, co wyróżnia pracę na tle większości znanych mi rozpraw. Mam jedynie zastrzeżenia dotyczące użycia słowa *ilość* zamiast słowa *liczba* oraz słowa *dedykowany* zamiast *przeznaczony*. **Bardzo wysoko oceniam edycję i walory językowe rozprawy.**

Jakość i dobór materiału ilustracyjnego również nie budzą zastrzeżeń. Rysunki są przejrzyste, ukierunkowane na prezentację istotnych informacji, ułatwiają śledzenie tekstu. Materiał ilustracyjny jest bogaty i czytelny.

4. Wątpliwości, zagadnienia dyskusyjne i uwagi krytyczne

4.1. Zagadnienia do dyskusji

Kilka poruszanych w rozprawie zagadnień wymaga dodatkowych wyjaśnień, uzupełnienia dyskusji lub przedstawienia dodatkowych informacji.

1. Czy równania przedstawione w punkcie 3.3 są wykorzystywane w kolejnych rozdziałach rozprawy? Proszę o wskazanie miejsca i sposobu wykorzystania tych równań. Analogiczna prośba dotyczy równań z punktu 3.5.
2. W punkcie 5.3 przedstawiono uproszczony model sił hydrodynamicznych działających na płetwy robota. Model nie jest wykorzystywany w układzie sterowania robota, czas obliczeń nie odgrywa zatem istotnej roli, dlatego nie ma istotnego powodu, by przesadnie upraszczać obliczenia. Wydaje się, że model miał służyć ilościowej analizie procesu generowania siły ciągu i badaniu jej zależności od różnych parametrów konstrukcyjnych. Współczesne metody CFD oferują możliwości precyzyjnej analizy przepływów przy uwzględnieniu całej gamy zjawisk (np. turbulencji, lepkości itp.), pozwalają na analizę obiektów o dowolnych kształtach itd. Metody CFD zostały zaimplementowane w oprogramowaniu inżynierskim i stanowią narzędzie powszechnie wykorzystywane. Dlaczego z nich nie skorzystano?

3. Osobnej dyskusji wymaga sam model sił hydrodynamicznych zilustrowany na rys. 3.12 i opisany równaniami (18) oraz (19). W każdym punkcie obracającej się płetwy prędkość $\vec{v}_n$, a więc także prędkość $\vec{v}_u$, jest inna. Jaką zatem prędkość należy wstawić do wzorów (18) i (19)? Gdzie należy przyłożyć siłę wypadkową? Proszę o uzupełnienie tych informacji, gdyż bez nich prezentowany model jest bezużyteczny.
4. W rozprawie – jak również w pracy [A124], na którą autor powołuje się, prezentując wyniki pomiarów (zilustrowanych na rys. 5.2) – brak jest jakichkolwiek informacji o stanowisku pomiarowym, na którym mierzono siły hydrodynamiczne. Szczegóły eksperymentu i sposób pomiaru sił nie zostały opisane, co jest poważnym uchybieniem, gdyż napęd w środowisku wodnym jest jednym z głównych zagadnień analizowanych w pracy. Liczę na uzupełnienie informacji o przeprowadzonych pomiarach.
5. We wzorach (23) i (24), inaczej niż we wzorach (18) i (19), uwzględniono fakt, że każdy punkt obracającej się płetwy ma inną prędkość liniową. Jednak przyłożenie wypadkowej siły hydrodynamicznej w środku cięciwy (rys. 5.5 i 5.6) jest błędem. Nie jest to błąd krytyczny w przypadku liczenia samej siły ciągu, gdyby jednak chcieć wykorzystać model do obliczenia momentu napędowego w osi nogi, wyniki byłyby niepoprawne. Dlaczego nie policzono położenia środka sił hydrodynamicznych? Wystarczyło wszak wyznaczyć moment sił względem osi obrotu, obliczając całkę analogiczną do (23), różniącą się jedynie dodatkowym s w funkcji podcałkowej.
6. Na rysunku 5.7 pokazano zdumiewającą (przynajmniej w mojej opinii) zgodność przewidywań teoretycznych z wynikami eksperymentu. Model teoretyczny jest bardzo uproszczony – nie uwzględnia innych niż płetwa elementów nogi, pomija subtelności kształtu płetwy (np. wyraźnie różne kształty krawędzi natarcia i krawędzi spływu), zakłada (jak miemam) laminarność przepływu i nielepkość cieczy, pomija zjawisko przestawiania się płetwy przy zmianie kierunku ruchu kończyny itd. Jedynym parametrem, który mógłby podlegać identyfikacji i posłużyć do dostrojenia modelu wydaje się być współczynnik C_d (pozostałe parametry, jak wymiary płetwy lub gęstość wody, trudno wykorzystać w tym celu). Proszę o wyjaśnienie, czy i w jaki sposób model był dostrajany do posiadanych wyników pomiarów. Proszę również o komentarz, dlaczego grube uproszczenia modelu nie przełożyły się istotnie na dokładność jego przewidywań.
7. Proszę o wyjaśnienie, czym jest tajemniczy parametr ϕ_0 , który raz określa „przesunięcie kątowe między sekwencjami obrotu”, innym razem „kierunek zmiany przemieszczania się robota”. Występuje też na rysunku 6.11, ale w dość przypadkowym, trudnym do zinterpretowania, miejscu.
8. Omawiane w rozdziale 6 przejście od ruchu po łuku okręgu do ruchu po cykloidzie (zob. rys. 6.14) jest we wcześniej przedstawianych wzorach analizowane wyłącznie na poziomie położenia. Autor rozprawy nie odniósł się do faktu, że prędkość obrotową kończyny wchodzącej w kontakt z podłożem należy dobrać szczególnie uważnie. Już pobieżna analiza wykazuje, że prędkość tę można dobrać w taki sposób, aby w momencie zetknięcia się nogi z podłożem pozioma składowa prędkości była zerowa. Niestety, minimalizacja składowej poziomej może się wiązać ze wzrostem składowej pionowej. I na odwrót: zmniejszanie pionowej prędkości uderzenia w podłoże może powodować wzrost składowej poziomej, skutkujący poślizgiem. Wydaje się, że zaproponowane na rys. 6.11 sekwencje obrotu nóg (równe prędkości obrotowe obu nóg w momencie przełączenia podparcia) odpowiadają warunkowi braku poślizgu. Zabrakło jednak rzetelnej, popartej równaniami lub rysunkami dyskusji na ten temat. Czy – i ewentualnie, dlaczego – brak poślizgu został uznany za ważniejszy niż zmniejszenie pionowej składowej prędkości nogi wchodzącej w kontakt z podłożem? Czy czysto kinematyczny model, pomijający działanie sił, jest adekwatny do analizy zjawisk towarzyszących przełączaniu podparcia? Analiza filmu [B5] w części pokazującej

kroczenie po płaskim terenie wskazuje, że w momencie przełączania podparcia tracona jest płynność ruchu.

9. Ze względu na skrótność opisu, nie mam jasności, czy dodatkowe badania dotyczące problemów obserwowanych w chwilach przełączania podparcia (ich opis zaczyna się na str. 100) miały charakter teoretyczny, czy eksperymentalny. Na czym polegały te badania? Czy analizowano problemy wskazane w poprzedniej uwadze? Proszę o uzupełnienie informacji.
10. Na stronie 86 odnajdujemy informację o fazie podwójnego podparcia, odpowiadającej jednoczesnemu kontaktowi wszystkich nóg z podłożem i trwającej przez czas t_d . Zwracam uwagę, że przy przyjętych założeniach dotyczących geometrii nóg i braku poślizgu, taka faza może trwać jedynie nieskończenie krótko – w chwili wejścia w kontakt przedniej nogi tylna powinna oderwać się od podłoża. Dwa tripody poruszającego się robota mogą jednocześnie pozostawać w kontakcie z podłożem jedynie wtedy, gdy dopuścimy możliwość poślizgu. Proszę o skomentowanie fazy podwójnego podparcia w czasie t_d większym od zera.
11. Zagadnienie rozpatrywane w rozdziale 7 to w istocie problem sterowania jedną osią w warunkach umiarkowanych zakłóceń (ruchowi płetwy w wodzie nie towarzyszą wszakże gwałtowne i nieoczekiwane zmiany obciążenia napędu). Zagadnienie precyzyjnego sterowania napędzaną osią jest rutynowo i skutecznie rozwiązywane w robotyce. Nie są jasne powody, dla których autor zdecydował się na zastosowanie regulacji nadążnej z wykorzystaniem regulatora PID lub jego wariantów. Wiadomo przecież, że istnieją znacznie lepsze metody, o czym sam autor wspomina pod koniec rozdziału 3. Jakie powody zaważyły na decyzji o wyborze algorytmu sterowania?
12. Omawiając dobór parametrów regulatora PID autor powołuje się na pracę Zeiglera i Nicholasa, a dalej informuje o „dodatkowym strojeniu”. Jak było przeprowadzone to dodatkowe strojenie, jakie metody zostały wykorzystane?
13. Rysunki 7.4 i 7.6 pokazują silnie oscylacyjne i nieregularne przebiegi sygnałów sterujących generowanych przy wykorzystaniu regulatora PID, świadczące o tym, że jakość regulacji pozostawia wiele do życzenia. Zabrakło natomiast wykresu przedstawiającego sygnały sterujące uzyskiwane przy użyciu regulatora PID niecałkowitego rzędu. Proszę o informację, jak wyglądały te sygnały sterujące. Czy sytuacja uległa poprawie?

4.2. Uwagi krytyczne

Krytycznie oceniam następujące elementy rozprawy.

1. We wzorze (2) został zdefiniowany „wektor rotacji zaczepiony w środku układu lokalnego B” (?!). Tak niefortunnie zdefiniowana wielkość została następnie użyta w równaniach (6), (13) i (14), czyniąc je błędnymi. Ta część rozprawy wymaga zatem solidnej erraty. Dodam, że w pracy [A27], na której bazował autor, nie ma takich błędów – wykorzystywana jest macierz kosinusów kierunkowych.
2. Przedstawiony w rozdziale 6 model chodu robota, opracowany w ramach realizacji zadania nr 2, odpowiadającego hipotezie badawczej dotyczącej użyteczności modelu, budzi spory niedosyt. Jest bowiem ograniczony do chodu na wprost po płaskim podłożu. Rozważania zawężono do samej kinematyki, przeanalizowano jeden rodzaj chodu, nie przewidziano analizy manewrów takich jak zmiana kierunku ruchu. Zadanie badawcze zostało zatem zrealizowane w sposób minimalistyczny.

3. Trzecia hipoteza badawcza, dotycząca możliwości poprawy jakości regulacji ma charakter samospełniającej się przepowiedni, skoro za punkt wyjścia wybrano wyjątkowo prosty algorytm, mając jednocześnie świadomość istnienia lepszych algorytmów sterowania.
4. W wielu miejscach rozprawy podawane są wyniki pomiarów. Poza nielicznymi wyjątkami, nie udało mi się jednak znaleźć informacji o dokładności tych pomiarów.

4.3. Pomyłki, nieścisłości i mankamenty dostrzeżone w rozprawie

Z recenzenckiego obowiązku odnotuję jeszcze pomyłki i nieścisłości oraz inne mankamenty dostrzeżone w rozprawie.

- Str. 12 – ostatni akapit zaczyna się od fragmentu zdania – wydaje się, że przypadkowo zostały usunięte fragmenty tekstu łączące w logiczną całość ostatni akapit z akapitami wcześniejszymi.
- Str. 31 – wbrew temu co napisano, układ umieszczony w środku ciężkości robota nie jest układem inercyjnym.
- Str. 34 – rozważania dotyczące sił działających na robota kończy zdanie „Dla innych typów ruchu lub innych warunków otoczenia analiza dynamiki robota typu RHex może być inna”. Zwracam uwagę, że w przypadku układów mechanicznych o dynamice mówimy wtedy, gdy wykorzystujemy równania ruchu. A w omawianych równaniach występowały tylko siły, brak było mas i przyspieszeń.
- Str. 35 – sformułowanie „kinematyka bezpośrednia” brzmi jak kalka lub automatyczne tłumaczenie z języka angielskiego. W polskiej terminologii przyjęło się określenie „kinematyka prosta”.
- Str. 46 – sformułowanie „skierowanej równolegle do punktu środka oscylacji” jest niezgrabne – nie wiadomo, czym jest równoległość do punktu.
- Str. 76 – założenie, że „noga robota FLHex posiada pomijalnie małą masę” jest zupełnie zbędne, gdyż w rozdziale 6 analizowana jest wyłącznie kinematyka. Założenie to jest powtórzone na str. 90.
- Str. 80 – w opisie fazy E1 występuje promień r , a powinien występować promień $2r$.
- Str. 83 – w trzeciej linii od dołu napisano „ruch obrotowy”, zamiast „ruch po łuku okręgu”. Korpus porusza się ruchem postępowym.
- Str. 87 – w podwójnej równości (53) środkowy człon jest bezwymiarowy, natomiast człony po lewej i prawej stronie mają wymiar prędkości kątowej.
- Str. 97 – oznaczenia linii w legendach rysunków 6.18 i 6.19 są pomyłone.
- Str. 105 – we wzorze (61), w funkcji podcałkowej nie powinna występować zmienna t , lecz np. τ .

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 analizy hybrydowych robotów kroczących. Jak wskazałem w punkcie 2 recenzji, autor dokonał przeglądu stanu wiedzy i na jego podstawie sformułował cele badawcze, do których realizacji zastosował właściwe metody, typowe dla dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych. Uzyskane rezultaty zawierają elementy nowości i wnoszą wkład w stan techniki, co **upoważnia autora do ubiegania się o stopień doktora**. Pan Piotr Burzyński **wykazał się umiejętnością prowadzenia pracy naukowej**.

Wątpliwości, zagadnienia dyskusyjne oraz krytyczne uwagi sformułowane w poprzednich punktach recenzji stanowią naturalną konsekwencję uważnej lektury. Sądzę, że właściwym miejscem do wyjaśnienia niejasności i uzupełnienia brakujących informacji będzie obrona rozprawy doktorskiej.

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** dotyczącego opracowania i zbadania innowacyjnych nóg maszyny kroczącej, umożliwiających lokomocję w zmiennym – wodnym lub lądowym – środowisku. Oceniane dzieło **spełnia w dostatecznym stopniu wymagania** przewidziane dla rozpraw doktorskich w aktualnie obowiązującym prawie. Dlatego **stawiam wniosek o dopuszczenie do publicznej obrony rozprawy doktorskiej mgra inż. Piotra Burzyńskiego** zatytułowanej *Zastosowanie D-kształtnej nogi w robotach typu RHex - modelowanie przemieszczenia*.