

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Piotra Burzyńskiego pod tytułem:

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

1. Ocena aktualności wybranego tematu

Aktualność wybranego tematu to zawsze wspólny mianownik takich czynników jak: zapotrzebowanie, dostępność rozwiązań i postęp wprowadzający dynamiczne zmiany czy to w produkcji, czy w procesie. Tematyka rozprawy dotyczy modelowania przemieszczenia robotów mobilnych typu RHex, wyposażonych w specyficzne odnóża o profilu C-kształtnym. Zagadnienie to wpisuje się w szeroki nurt badań nad robotyką, która czerpie inspiracje z natury w celu rozwiązywania problemów inżynierskich, z którymi klasyczne układy mechaniczne nie potrafią sobie poradzić.

Dynamiczny rozwój robotyki mobilnej obserwujemy szczególnie w obszarze zastosowań specjalnych, gdzie klasyczne układy jezdne – kołowe czy gąsienicowe – napotykają na nieprzekraczalne bariery. Poruszanie się w terenie nieustrukturyzowanym, takim jak gruzowiska po katastrofach budowlanych, obszary dotknięte klęskami żywiołowymi, czy też zróżnicowane geologicznie powierzchnie, wymaga redefinicji podejścia do układów lokomocji. W takich warunkach roboty kroczące, a w szczególności konstrukcje wielonożne (hexapody), wykazują znaczącą przewagę w zakresie stabilności i zdolności pokonywania przeszkód.

Konstrukcja RHex, znana w świecie nauki od początku XXI wieku, stanowi kanoniczny przykład wykorzystania tzw. „inteligencji morfologicznej”. Jednakże, o ile sama koncepcja mechaniczna jest znana i ceniona za swoją odporność i uniwersalność, o tyle precyzyjne modelowanie dynamiki takiego układu wciąż stanowi otwarte i nietrywialne zagadnienie badawcze.

Konkludując, podjęta przez Doktoranta w dysertacji problematyka modelowania przemieszczeń robota z napędem nożnym o elementach podatnych, w kontekście poszukiwania dokładniejszych metod opisu ruchu niż te powszechnie stosowane, jest w mojej ocenie aktualna i posiada istotne walory poznawcze oraz aplikacyjne.

2. Przegląd treści pracy

Treść opiniowanej rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Burzyńskiego pt. „Zastosowanie D-kształtnej nogi w robotach typu RHex – modelowanie przemieszczenia” została zawarta na 159 stronach maszynopisu. Układ pracy obejmuje 9 rozdziałów, spis oznaczeń, streszczenie w języku polskim i angielskim, spis rysunków i tabel oraz bibliografię, w której zestawiono 169 pozycji literaturowych, w tym znaczącą liczbę źródeł obcojęzycznych, co świadczy o dobrym rozeznaniu Autora w światowym stanie wiedzy. Praca została zilustrowana 77 rysunkami oraz zawiera 8 tabel.

Rozdział pierwszy stanowi wstęp, w którym Autor wprowadza czytelnika w problematykę, definiuje robotykę mobilną jako dziedzinę zajmującą się urządzeniami zdolnymi do zmiany położenia w przestrzeni (jeżdżenie, pływanie, latanie) w celu realizacji określonych zadań. Wprowadzenie nakreśla tło historyczne, od pierwszych projektów takich jak kołowy robot Shakey (DARPA), przez roboty kroczące naśladujące organizmy biologiczne (Phony Pony, Quadruped GE), aż po zaawansowane konstrukcje humanoidalne.

Rozdział drugi zawiera systematykę robotów mobilnych przeprowadzoną według środowiska pracy (wodne, lądowe, hybrydowe) oraz sposobu lokomocji. Autor analizuje roboty kroczące po lądzie, dzieląc je ze względu na stabilność ruchu na statycznie stabilne (np. hexapody), dynamicznie stabilne (np. roboty skaczące) oraz quasi-statycznie stabilne. Omawia różne konfiguracje nóg (od jednej do wielu) i diagramy chodu, ze szczególnym uwzględnieniem chodu trójpodporowego jako najszybszego sposobu statycznie stabilnego przemieszczania się sześcionogów. W odniesieniu do środowiska wodnego uwagę poświęca robotom pływającym i hybrydowym. Przedstawia pojazdy podwodne pracujące w połączeniu z innymi jednostkami (ROV), w pełni autonomiczne (LoCo) oraz roboty naśladujące ruch ryb czy żółwi za pomocą płetw. Omawia roboty hybrydowe, które łączą różne sposoby lokomocji (np. Salamandra Robotica II, ANYmal krocząco-kołowy) oraz wprowadza pojęcie amorfizmu jako zdolności do zmiany konfiguracji (aktywnej lub pasywnej) w celu dostosowania się do otoczenia.

Rozdział poświęcony jest specyficznej klasie sześcionożnych robotów RHex, charakteryzujących się prostą konstrukcją i wysoką sprawnością energetyczną.

Klasyczny RHex posiada sześć silników napędzających prętowe lub C-kształtne nogi. Autor analizuje modele kinematyczne robota oraz dynamiczne uproszczone do modelu typu SLIP (Spring Loaded Inverted Pendulum),

Opisuje sposób generowania sił hydrodynamicznych (oporu i siły nośnej) przez oscylujące płetwy. Zwraca uwagę na asymetryczny sposób generowania ciągu (faza napędowa i powrotna), który jest bardziej efektywny energetycznie niż ruch symetryczny. Dalszą część poświęca regulatorom PID/PD stosowanym do sterowania pozycją nóg.

W podsumowaniu nakreśla kierunki badań które jego zdaniem można podjąć w celu poprawy funkcjonalności konstrukcji.

Na podstawie scharakteryzowanych zadań badawczych wymagających dalszych prac w rozdziale czwartym formułuje trzy kluczowe hipotezy badawcze, takie jak: zastosowanie nogi D-kształtnej pozwoli robotowi RHex na skuteczne przemieszczanie się w obu środowiskach wodnym i lądowym, opracowany model matematyczny pozwoli na optymalny dobór parametrów konstrukcyjnych i sekwencji obrotu nóg oraz, że modyfikacja algorytmu sterowania PID (na FOPID) poprawi jakość regulacji i zmniejszy zużycie energii.

Rozdział piąty dotyczy procesu projektowania i budowy autorskiego robota hybrydowego FLHex. D-kształtna noga jest to autorska konstrukcja łącząca zalety C-kształtnej nogi (niezbędnej do kroczenia po lądzie) z mechanizmem flapped-paddle fin. Noga posiada pasywnie otwierające się i zamykające kłapy, co pozwala na asymetryczne generowanie sił hydrodynamicznych. Kłapy zamykają się w fazie napędowej, tworząc pełną powierzchnię oporową, a otwierają w fazie powrotnej, minimalizując opór. Przeprowadzono testy lokomocji na lądzie (chód trójpodporowy, wspinanie po schodach, przechodzenie przez przeszkody) oraz na powierzchni wody (pływanie dzięki oscylacji nóg). Potwierdzono, że noga D-kształtna zapewnia pasywny amorfizm i efektywne przemieszczanie się w obu środowiskach.

W rozdziale 6 poświęconym modelowaniu przemieszczania się robota FLHex Autor przedstawia matematyczny opis ruchu robota na lądzie. Opracował model ruchu środka ciężkości robota podczas synchronicznego obrotu nóg, dzieląc go na etapy: E1 ruch do chwili zetknięcia się korpusu z podłożem, noga w fazie podparcia, następnie etap E2, gdzie noga odrywa się od podłoża, noga jest w fazie przenoszenia, etap E3, noga jest w fazie podparcia, korpus robota wznosi się względem podłoża. Etap E3 kończy się powrotem układu do przemieszczenia kąтового będącego początkiem etapu E1. Cykl się zamyka.

Dalsze rozważania dotyczą sekwencji obrotu nóg robota FLHex wykorzystywanych w chodzie trójpodporowym. Można zauważyć, że na chód trójpodporowy robota FLHex składają się fazy naprzemiennego wznoszenia i opadania jego korpusu.

Opracowany model zweryfikowano na autorskim stanowisku pomiarowym z szynami liniowymi i czujnikami odległości wykazując zbieżność prac symulacyjnych z eksperymentem.

Syntezę algorytmów regulacji przemieszczenia kąтового D-kształtnej nogi Doktorant zawarł w rozdziale 7. W pierwszym podejściu zaimplementował klasyczny regulator PID do

zapewnienia przemieszczenia kąowego D-kształtnej nogi robota FLHex w środowisku wodnym. Mając na uwadze w szczególności zużycie energii zaproponował jego modyfikację. Zastąpienie regulatora PID regulatorem niecałkowitego rzędu FOPID zrealizowanego z wykorzystaniem filtru Oustaloup'a. Pomimo wyższych wymagań obliczeniowych, zastosowanie tego typu regulatora pozwoliło polepszyć właściwości dynamiczne układu, przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia energii.

Autor podsumowuje pracę, potwierdza słuszność postawionych hipotez. Głównym osiągnięciem jest opracowanie amorficznej D-kształtnej nogi, modelu statycznie stabilnego chodu trójpodporowego oraz wykazanie korzyści z zastosowania sterowania niecałkowitego rzędu.

W ostatnim rozdziale dziewiątym znajdujemy kierunki dalszych badań nakreślone jako wykonanie wersji w pełni wodoodpornej zdolnej do operowania pod wodą, opracowanie sparametryzowanego modelu dynamicznego robota FLHex poruszającego się pod wodą, uwzględniającego parametry konstrukcyjne oraz sekwencje obrotu kończyn. Dalej zastosowanie regulacji adaptacyjnej oraz predykcyjnej, zarówno w chodzie po lądzie, jak i w przemieszczaniu się w zbiornikach wodnych.

Pracę kończy wykaz literatury z wyszczególnieniem źródeł internetowych, spis rysunków oraz spis tabel.

3. Wyniki pracy i ich ocena

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy tematyki opracowania D-kształtnej nogi wykorzystanej w robocie typu FLHex, modelowania jego przemieszczania oraz syntezy sterowania ruchem autorskiej nogi.

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.

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. Część pracy dotyczącą opisu ruchu C-kształtnej nogi oceniam wysoko.

Praca dotyczy zagadnień mechaniki, automatyki, czy sterowania, przez co ma charakter interdyscyplinarny i jest to niewątpliwie jej mocna strona. Autor wykazał umiejętność poruszania się w zagadnieniach z różnych dyscyplin takich jak: inżynieria mechaniczna, automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, informatyka techniczna. Jest to niewątpliwie zaleta pracy.

Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta przedstawionych w pracy należą opracowanie autorskiej konstrukcji hybrydowego robota FLHex oraz innowacyjnej D-kształtnej nogi, która dzięki pasywnemu amorfizmowi pozwala na sprawne poruszanie się w środowisku wodno-ładowym bez potrzeby mechanicznej rekonfiguracji. Autor stworzył zaawansowany model matematyczny chodu trójpodporowego. Ponadto zaimplementował regulator niecałkowitego rzędu FOPID, do poruszania D-kształtną nogą w środowisku wodnym, co poprawiło jakość sterowania i zredukowało zużycie energii. Pan Burzyński wykazał również wyższą efektywność asymetrycznego generowania sił hydrodynamicznych przez nową konstrukcję nóg w porównaniu do klasycznych rozwiązań, co potwierdził licznymi testami.

Dysertacja zawiera też treści, które wymagają doszczegółowienia, wyjaśnienia, zawarłem je poniżej.

W zaproponowanym eksperymencie dotyczącym weryfikacji modelu przemieszczania się robota FLHex przy chodzie trójpodporowym, dokonano wielu uproszczeń. Wprowadzono łożysko linowe w postaci wózka, które charakteryzuje się zmiennym tarcie (efekt Stribeck), co niewątpliwie zaburza eksperyment. Samo zastosowanie przewodnicy liniowej jest też mocno dyskusyjne. Brak wzajemności oddziaływań C-kształtnych nóg.

Zastosowano jako czujniki odległości sensory wykorzystujące podczerwień typu Sharp GP2Y0A21YK0F na kierunku poziomym oraz GP2Y0A41SK0F na kierunku pionowym. Są to czujniki nieliniowe, w jaki sposób przeprowadzono linearyzację, jak to wpłynęło na dokładność pomiaru odległości ?. Brak jest w pracy oszacowania dokładności prowadzonych pomiarów, z jakimi błędami pomiarowymi zaprezentowano wykresy.

Jako napęd wykorzystano silnik prądu stałego z przekładnią i enkoderem. Charakteryzują się one brakiem liniowości czy nawet możliwości sterowania prędkością w funkcji momentu obrotowego dla małych prędkości obrotowych. Przy wykorzystaniu 8-bitowego systemu przesyłu danych pozostaje niewiele stanów do regulacji, co rzutuje na jakość prowadzonych prac zwłaszcza w obszarze sterowania.

W pracy Autor stwierdza, że układ sterowania ruchem D-kształtnej nogi jest to „układ nadążny”, należy w takim wypadku rozważyć zasadność stosowania członu całkowitego w rozpatrywanych regulatorach.

Opis doboru napędu w rozdziale konstrukcyjnym jest niewystarczający. Autor podaje typ silnika, ale nie przedstawia analizy zapotrzebowania na moment obrotowy w funkcji fazy chodu. W robotach kluczowe jest sprawdzenie, czy napęd jest w stanie zapewnić odpowiednią dynamikę przemieszczenia kątownego przy maksymalnym obciążeniu.

Weryfikacja modelu w podrozdziale 6 dotycząca porównania pomiarów eksperymentalnych z odpowiadającymi symulacjami zaimplementowanego modelu chodu trójpodporowego robota FLHex przy różnych parametrach opiera się na wykresach porównawczych. Brakuje jednak ilościowej oceny błędu odwzorowania. Wartości takie jak błąd średniokwadratowy (RMSE) czy współczynnik korelacji pozwoliłyby na obiektywną ocenę porównawczą, zamiast sformułowań typu „największe rozbieżności między wynikami”.

Zaprezentowane uwagi nie deprecjonują wartości merytorycznej dysertacji, wymagają dyskusji i zrozumienia przez Doktoranta jak wprowadzone uproszczenia, mogą wpływać na

finalną jakość eksperymentów oraz czy upoważnia to Autora do wyciąganie takich, a nie innych wniosków.

Poniżej zawarłem uwagi o „mniejszym ciężarze gatunkowym” dzieląc je na uwagi ogólne i uwagi szczegółowe.

Uwagi ogólne:

Sformułowania dotyczące doboru parametrów regulatora PID (str. 48), powinny się odnosić do generowanego sygnału sterowania, nie do właściwości układu. Układ jest niezmienny, czas reakcji, jego stała czasowa nie zmienia się.

W technice nie operujemy opisami wysoka, niska czy wysoki niski, należy się do czegoś odnieść np. str. 64 co znaczy niska inercja, kiedy jest niska ?. Inne przykłady: str. 59 „niska bezwładność”, str. 117 „niska wydajność”, str. 48 „wysokiej precyzji”, str. 50 „wysokiej jakości”, str. 60 „wysoki moment”, str. 119 „wysoka dokładność” dotyczy to także „wystarczającej mocy” itd.

Odwołanie do nagrania B5 nie można odszukać.

W tabeli 2.2 znajdujemy sentencję „Ruch opisany zasadami kinematyki”, jakie zasady Autor dysertacji miał na myśli.

Poniżej zamieściłem wykaz błędów, pomyłek nieprecyzyjnych, sformułowań które nie umniejszają wartości merytorycznej pracy, a mogą być wskazówką dla Autora na przyszłość.

Uwagi szczegółowe:

Str. 12₁₆ – zdanie z małej litery

Str. 12₆ – „nóg wykorzystywanej”, błąd stylistyczny

Str. 30₁ – „niewielkim zakresie”, sformułowanie nieprecyzyjne

Str. 41 – proponuję nie zaczynać podrozdziału od „Aby”

Str. 64₅ – „prądem o napięci”, niepoprawne sformułowanie

Bardzo częste mylenie „liczba”, „ilość” str.16 „ilość stopni swobody”, str.17 „ilość nóg”, „ilość kończyn”, str. 18 „ilość nóg”, str.19 „ilość członów”, str.20 „ilość stopni swobody”, „ilość układów napędowych”, str.23 „ilość modułów napędowych”, str.30 „ilość elementów”, str.35 „ilość parametrów”, str. 118 „ilość kroków”, str.119 „ilość stopni swobody”.

W pracy jest szereg rysunków w których podpisy, z powodu zbyt małej czcionki są nieczytelne.

Podsumowując, praca napisana jest poprawnym językiem, a liczba błędów stylistycznych i językowych pozycjonuje ją wśród najlepszych prac jakie do tej pory recenzowałem.

4. Wnioski końcowe

Recenzowana rozprawa doktorska pt. „Zastosowanie D-kształtnej nogi w robotach typu RHex – modelowanie przemieszczenia” dotyczy istotnego i aktualnego problemu badawczego, jakim jest analiza ruchu robotów mobilnych. Doktorant przeprowadził kompleksowy proces badawczy, obejmujący analizę teoretyczną, modelowanie numeryczne oraz weryfikację eksperymentalną. Autor wykazał się biegłością w stosowaniu zaawansowanych narzędzi inżynierskich, zarówno w obszarze symulacji komputerowej, jak i w zakresie budowy stanowisk badawczych i akwizycji danych.

Praca ma charakter interdyscyplinarny, łącząc w sobie zagadnienia z zakresu mechaniki ogólnej, automatyki, elektroniki, elektrotechniki i technologii kosmicznych. Taka synteza dyscyplin świadczy o dojrzałości naukowej Kandydata i jego przygotowaniu do samodzielnego prowadzenia prac badawczych.

Wskazane w recenzji uchybienia, dotyczą głównie sformułowań, pewnych niekonsekwencji terminologicznych oraz sposobu przygotowania eksperymentu. Należy je traktować jako polemikę naukową oraz wskazówki do uwzględnienia w przyszłej działalności publikacyjnej i badawczej Autora.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Burzyńskiego stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w danej dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Uważam, że opiniowana praca spełnia wymagania stawiane pracom zgodnie z obowiązującymi przepisami i wnoszę do Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej o dopuszczenie Pana mgr. inż. Piotra Burzyńskiego do dalszych etapów postępowania.

Burzyński P.