dr hab. inż. Dominik Belter, prof. PP
Politechnika Poznańska
Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki

Poznań, 14 czerwca 2022 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej inżyniera Maksymiliana Szumowskiego pt.: „Opracowanie metody syntezy ruchów dynamicznych robota humanoidalnego"

1 Podstawa wykonania recenzji

Niniejsza recenzja dotyczy rozprawy doktorskiej inż. Maksymiliana Szumowskiego zatytułowanej: „Opracowanie metody syntezy ruchów dynamicznych robota humanoidalnego" w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika. Promotorem opiniowanej rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Teresa Zielińska. Recenzja została przygotowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej z dnia 19.04.2022. Zgodnie z informacją dodatkową, załączoną do powyższego pisma, postępowanie o nadanie stopnia naukowego doktora inż. Maksymilianowi Szumowskiemu procedowane jest według:

- §6.4 Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 30 stycznia 2018 r., poz 261)
- art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14.03.2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z dnia 21.06.2016 r., poz. 882)

2 Rozprawa doktorska

2.1 Struktura rozprawy

Rozprawa doktorska zredagowana jest w formie 8 rozdziałów i obejmuje 167 stron. Zestawienie literatury zawiera 165 pozycji, w tym 42 prace z ostatnich pięciu lat. Sześć pozycji literaturowych stanowią współautorskie prace Doktoranta.

Rozdział pierwszy wprowadza do tematyki rozprawy. Na początku rozdziału znajduje się ogólny opis rozwoju robotyki. Przedstawiono analizę zapotrzebowania na roboty przemysłowe, mobilne, współpracujące i społeczne. Zaprezentowano prognozy rozwoju robotyki związane z potencjalnymi potrzebami rynkowymi. Rozdział kończy się opisem przyszłych trendów rozwoju robotyki, co stanowi wstęp do uzasadnienia zapotrzebowania na roboty humanoidalne.

W rozdziale drugim przedstawiono stan wiedzy związany z generowaniem ruchu robotów humanoidalnych. Na początku wprowadzono opis wzorca chodu wykorzystywanego na robotach humanoidalnych. Kolejny podrozdział dedykowany jest zagadnieniu modelowania dynamiki robotów humanoidalnych. W podrozdziale 2.3 opisano kryterium ZMP pozwalające na zachowanie stabilności robota kroczącego, a w kolejnym rozdziale przedstawiono metody pomiaru położenia ZMP na rzeczywistym robocie. Kolejny rozdział opisuje metodę opartą o punkty kontrolne „Capture Point". W podrozdziale 2.6 opisano alternatywne metody generowania ruchu oraz chodu robotów humanoidalnych.

Rozdział trzeci przedstawia uzasadnienie podjęcia tematu, sformułowanie problemu, tezy pracy oraz przyjęte założenia.

Rozdział czwarty dedykowany jest opisowi systemu sterowania. Zaproponowana w opisywanej pracy struktura systemu sterowania robotem humanoidalnym wykorzystuje podejście wieloagentowe. Zaprojektowano strukturę składającą się z czterech agentów odpowiedzialnych za: interfejs użytkownika, planowanie ruchu, lokalizację i budowanie mapy oraz sterowanie napędami. Kolejne podrozdziały opisują szczegółowo ich wewnętrzną strukturę, wymianę danych między agentami, wymianę danych miedzy podsystemami agentów, a także proponowane zachowania z przypisanymi funkcjami tranzycji.

W rozdziale piątym przedstawiono koncepcję algorytmu wyszukiwania ścieżki oraz modułu generowania ruchu. Algorytm wyszukiwania ścieżki realizuje zadanie generowania scenariusza ruchu złożonego z listy kolejnych prymitywów ruchu. Proponowana metoda wykorzystuje algorytm RRT do nadrzędnego planowania ścieżki. Zadaniem algorytmu wyszukiwania ścieżki jest znalezienie ścieżki ruchu robota z pozycji początkowej do pozycji końcowej z ominięciem przeszkód znajdujących się w środowisku reprezentowanym przez mapę zajętości. Moduł Generowania Ruchu realizuje zadanie generowania prymitywów ruchowych realizujących podstawowe ruchy robota. System generowania prymitywów ruchowych składa się z 4 głównych modułów: określenia zadania, planera kroków i trajektorii punktów charakterystycznych, generatora trajektorii środka masy robota, oraz modułu rozwiązania zadania odwrotnego kinematyki. Specyfikacja zadania ruchowego odbywa się poprzez zdefiniowanie pozycji końcowej robota. Następnie planer kroków generuje informacje o kolejnych punktach podparcia. W kolejnym module planowane są trajektorie punktów

charakterystycznych oraz środka masy robota. Poruszanie środkiem masy robota odbywa się w sposób gwarantujący, aby trajektoria ZMP znajdowała się w miejscu zapewniającym równowagę dynamiczną.

W rozdziale szóstym zaprezentowano szczegółowo metody generowania ruchu. Rozdział ten przedstawia najważniejsze oryginalne osiągnięcia Doktoranta, stanowiące naukową wartość rozprawy. W rozdziale 6.1 opisany jest planer kroków, w rozdziale 6.2 planer trajektorii punktów charakterystycznych, w rozdziale 6.3 generowanie trajektorii środka masy robota (również z uwzględnieniem dodatkowego obciążenia robota), a w rozdziale 6.4 zadanie odwrotne kinematyki. Rozdział 6.4.3 prezentuje dodatkowo metodę optymalizacji wydatku napędowego. Implementacja każdego z modułów została szczegółowo opisana z uwzględnieniem istotnych różnic między platformami testowymi, które mają wpływ na model dynamiki lub kinematyki.

Rozdział siódmy przedstawia badania i wyniki eksperymentalne na trzech platformach sprzętowych LEM1, LEM2, oraz Melson. Pierwsze podrozdziały opisują szczegółowo roboty wykorzystane podczas eksperymentów oraz zadania i scenariusze ruchowe wykorzystane podczas eksperymentów. W kolejnym podrozdziale (7.2) przedstawiono wyniki dotyczące chodu ze stałą długością kroków, z krokami o zmiennej długości, chodu prostoliniowego z sukcesywną zmianą orientacji, uderzenia piłki, minimalizacji momentów napędowych i planowania trasy.

Rozdział ósmy podsumowuje rozprawę, przedstawia wnioski końcowe i kierunki dalszych prac.

2.2 Ogólna charakterystyka podjętej tematyki

Przedmiotem rozprawy jest opracowanie metody syntezy ruchów dynamicznych i planowanie ruchu robota humanoidalnego. Badania obejmują integrację systemu sterowania, opracowanie metody generowania prymitywów ruchowych, zasad działania modułu generowania ruchu oraz algorytm wyszukiwania ścieżki.

Za cel rozprawy obrano również uzupełnienie uproszczonych modeli dynamiki robota humanoidalnego poprzez dodawanie elementów imitujących dodatkowe obciążenie robota. Drugim kierunkiem jest opracowanie metod wykorzystania redundancji kinematycznej robotów humanoidalnych do redukowania wydatków napędowych.

Synteza chodu dla robotów humanoidalnych jest problemem trudnym. Roboty humanoidalne są obiektami dynamicznymi, a w trakcie chodu zmienia się charakter pracy poszczególnych nóg podczas przechodzenia z fazy jednopodporowej do dwupodporowej. W pracy analizowany jest również problem zachowania stabilności dynamicznej podczas chodu. Rozpatrywany w rozprawie robot ma redundantną strukturę kinematyczną, która może zostać wykorzystana do realizacji dodatkowego zadania (w przypadku rozprawy do redukowania wydatków napędowych). Podsumowując, podjęta tematyka rozprawy jest aktualna i ma duże znaczenie praktyczne i naukowe.

2.3 Problem naukowy i teza rozprawy

Problem naukowy i tezy pracy zostały jednoznacznie zdefiniowane. Pierwszym problemem naukowym rozpatrywanym w rozprawie jest rozwinięcie uproszczonego modelu dynamiki robota humanoidalnego o elementy umożliwiające uwzględnienie dodatkowego obciążenia oddziałującego na robota. Drugim problemem analizowanym w pracy jest wykorzystanie nadmiarowych stopni swobody do kształtowania postury robota, tak aby minimalizować wydatki energetyczne.

Teza główna została zdefiniowana następująco:

Możliwe jest opracowanie metody generowania ruchu robota humanoidalnego z uwzględnieniem uproszczonych modeli dynamiki, mając na uwadze wydatki napędowe oraz rodzaj zadań ruchowych. Ponadto, opracowana metoda generowania ruchu może zostać przełożona na spójną koncepcję systemu sterowania.

Teza rozprawy udowodniona jest przy pięciu założeniach:

- ruch opracowany z wykorzystaniem uproszczonego modelu dynamiki z dodatkowym członem opisującym obciążenie testowany jest z wykorzystaniem robota płaskiego o ośmiu stopniach swobody,
- testowanie rozwiązania problemu redundancji realizowane jest z wykorzystaniem robota o 18 stopniach swobody,
- generowanie prymitywów ruchowych odbywa się w trybie offline, z możliwością generowania prymitywów ruchowych w trybie online,
- generowanie prymitywów ruchowych dotyczy dowolnych kierunków ruchu przy chodzie po terenie płaskim,
- nie uwzględnia się zagadnienia wyznaczania pozycji przeszkód z wykorzystaniem systemu wizyjnego jak też pominięto specyfikację działania interfejsu człowiek-robot.

2.4 Rozwiązanie postawionego problemu

Postawione problemy zostały rozwiązane poprzez opracowanie metody generowania ścieżki ruchu robota humanoidalnego, opracowanie metody generowania prymitywów ruchowych zapewniających stabilność dynamiczną i minimalizację momentów napędowych robota (wyniki przedstawione w rozdziale 7.2.5) oraz opracowanie sposobu nadzoru realizacji ścieżki z wykorzystaniem prymitywów ruchowych. Ponadto zdefiniowano specyfikację systemu sterowania robota humanoidalnego.

2.5 Na czym polega oryginalny dorobek autora i jakie jest jego znaczenie poznawcze i aplikacyjne

Oryginalny dorobek Doktoranta można zdefiniować następująco:

- opracowanie metody generowania prymitywów ruchowych zapewniających stabilność dynamiczną robota z uwzględnieniem uproszczonych modeli dynamiki do minimalizacji wydatków napędowych,
- opracowanie metody generowania ścieżki ruchu robota pozwalającej na dojście robota do pozycji zadanej i unikanie kolizji z przeszkodami,
- opracowanie kompletnego systemu sterowania robota humanoidalnego oraz jego implementacja na rzeczywistych robotach kroczących.

Opracowane metody pozwalają na lepsze zrozumienie mechanizmów kierujących lokomocją nożną. Z aplikacyjnego punktu widzenia opracowane metody pozwalają na budowę robotów kroczących efektywnie wykorzystujących swoje możliwości ruchowe.

3 Uwagi merytoryczne

3.1 Silne i słabe strony pracy, uwagi dyskusyjne

- Na stronie 27 wymienione są ogólne cechy chodu dwunożnego ludzi i maszyn kroczących. W punkcie drugim wymieniona jest zasada polegająca na „minimalizacji siły uderzenia stopy o podłoże". Znaleźć można prace (H. Geyer, A. Seyfarth, R. Blickhan, Compliant leg behaviour explains basic dynamics of walking and running, Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, vol. 273(1603), s. 2861-2867, 2006), które wskazują, że ludzie zarówno podczas chodu, jak i biegu zamieniają energię kinetyczną na energię sprężystą w ścięgnach i odzyskują tę energię w kolejnej fazie kroku. Podobne zachowanie realizowane jest na robotach kroczących, a do gromadzenia energii wykorzystuje się elementy sprężyste lub napędy bezpośrednie. Jak należy interpretować regułę wymienioną w pracy z wynikami pracy H. Geyer, A. Seyfarth i R. Blickhan?
- Na stronie 27 wymieniona jest również zasada, która dotyczy chodu i zakłada ona konieczność „pochłaniania zakłóceń związanych z uderzeniem stopy o podłoże". Ponownie zasada ta stoi w przeciwieństwie do obserwacji mechanizmów występujących w przyrodzie, a z praktycznego punktu widzenia nie pozwala na odzyskiwanie energii. Na czym dokładnie polega pochłanianie zakłóceń? Czy wiąże się to z dysypacją energii?
- Dlaczego zdecydowano się na wykorzystanie algorytmu RRT i przetestowanie tego algorytmu z dwiema różnymi heurystykami? Jakie korzyści mogłoby mieć zaimplementowanie optymalnego asymptotycznie algorytmu RRT* do tego zadania w stosunku do obecnej implementacji?
- Na stronie 81 przedstawiono wykorzystanie tzw. „heurystyki A*" w algorytmie RRT do znajdowania najbliższego sąsiada. Rozwiązanie to jest bardzo ciekawe, ale brakuje

w pracy porównania tej strategi do strategii wyszukiwania z użyciem odległości euklidesowej. Interesujące byłyby zarówno wyniki jakościowe, pokazujące rozrost drzewa, jak i wyniki ilościowe, pokazujące wpływ strategi na czas planowania i uzyskaną długość ścieżki.

- Na stronie 145 znajduje się stwierdzenie określające dokładność dojścia do pozycji zadanej na 10 cm. Ta wartość wydaje się bardzo duża w odniesieniu do wymiarów robota. Czy taka dokładność pozycjonowania wystarczy, żeby uderzyć piłkę?

- Na stronie 147 wspomniana jest implementacja algorytmu informed RRT. Wcześniej jednak opisywana jest tradycyjna wersja algorytmu RRT. Rysunki również wydają się ilustrować zastosowanie algorytmu RRT. Czy algorytm informed RRT również został zaimplementowany w ramach pracy?

3.2 Ważniejsze uwagi szczegółowe

- Na stronie 39 podane jest wyjaśnienie indeksów „dla lewej stopy m=L, a dla prawej m=R". Wcześniej podane symbole mają indeks i oznaczający numer czujnika. Czy w wyjaśnieniu zamiast symbolu m nie powinien być umieszczony symbol i?

- Strona 66: odwołanie do rysunku 4.8 – powinno być odwołanie do rysunku 4.5.

- Na rysunkach 6.7 i 6.8 na stronie 102 jest niezgodność między opisami osi rzędnych i opisami rysunków.

- Na stronie 131 przedstawione są prymitywy ruchowe - czy one różnią się między sobą? Z punktu widzenia kinematyki robota, ogólny algorytm powinien przyjmować na wejściu przekształcenie jednorodne, które określa kierunek ruchu robota lub jego elementów, np. stopy.

- Na rysunku 6.12 na stronie 107 występuje niezgodność wyjścia z modułu ($x_{ZMP}(k)$) i opisu w tekście $y_{ZMP}(k)$

- s. 29: "Przykładowo wykorzystanie sieci neuronowej do generowania chodu [29] [48], chodzenia na wyboistm podłożu [105], ruch omnikierunkowy z wykorzystaniem głębokich sieci neuronowych [117]." - brak orzeczenia w zdaniu

- Pozostałości po komentarzach edytorskich: „może jakieś cytowanko" (s. 37), „[tutaj wstawić rysunek z różnymi pozami robota dla tego samego zadania]" (s. 49),

- s. 38: "zastosowanie czujników siły zmniejszenia ryzyko" - zastosowanie czujników siły zmniejsza ryzyko

- s. 45: "które w celu opisu są tutaj opisane"

- s. 56: "pisujące" - opisujące

- Na stronie 90 wymienione są różnie metody generowania trajektorii środka masy. W tym fragmencie brakuje odniesienia do wymienionych metod i informacji, jaka metoda została zrealizowana w pracy i jakie są zalety wybranej strategii.
- Spis literatury – wiele znaków specjalnych nie jest wyświetlanych poprawnie

4 Wnioski końcowe

Powyższe uwagi nie umniejszają wartości merytorycznej pracy. Przyjęte w rozprawie założenia są prawidłowe, a Doktorant rozwiązał postawione zagadnienia oraz użył właściwych metod. Rozprawa świadczy o wiedzy na zaawansowanym poziomie o charakterze podstawowym dla dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych oraz o charakterze szczegółowym, dotyczącym lokomocji robotów humanoidalnych. Rozprawa obejmuje najnowsze osiągnięcia nauki i świadczy o znajomości współczesnej literatury z dyscypliny naukowej automatyki i robotyki. W rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle. Inż. Maksymilian Szumowski wykazał się umiejętnością poprawnego i przekonywującego przedstawiania uzyskanych przez siebie wyników. Wyniki przedstawione są w sposób zwięzły i przejrzysty.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie aktualnego i ważnego problemu naukowego w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika oraz potwierdza wiedzę teoretyczną i umiejętność samodzielnego rozwiązywania problemów naukowych przez Doktoranta. Rozprawa w pełni spełnia ustawowe wymagania dotyczące rozpraw doktorskich określone w artykule 13 ust 1. Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z dnia 21.06.2016 r., poz. 882).

Wnioskuję do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie rozprawy inż. Maksymiliana Szumowskiego do publicznej obrony.

Dominik Belter