

RECENZJA

rozprawy doktorskiej inż. Maksymiliana Szumowskiego na temat „Opracowanie metody syntezy ruchów dynamicznych robota humanoidalnego”

(Opinia niniejsza została przygotowana na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej)

1. Przedmiot rozprawy

Planowanie ruchu robotów humanoidalnych oraz ich praktyczna realizacja to aktualne zagadnienia naukowe rozwijane przez szereg zespołów pracujących w ośrodkach naukowych w różnych krajach. To ambitny cel kilku międzynarodowych konkursów robotycznych z kategorii RoboCup oraz DARPA Challenge – wykorzystujących humanoidy do zastępowania lub wspomagania człowieka w rozmaitych zadaniach. To także bieżąca potrzeba, wciąż niedużej, ale rosnącej grupy producentów dostrzegających potencjał maszyn kroczących imitujących posturę człowieka. Należy także zauważyć, że temat ten zyskał uznanie recenzentów programu Diamentowy Grant co dało możliwość Doktorantowi zrealizowania projektu pt. Opracowanie i przetestowanie metody syntezy ruchów dynamicznych z wykorzystaniem robota własnej konstrukcji (nr 0072/DIA/2014/43). Planowanie ruchu bipedów jest bardzo złożonym i wielopoziomowym działaniem, które obejmuje: zdefiniowanie zadania, określenie sekwencji kroków i/lub dodatkowych działań rąk i nóg, weryfikację stabilności postury (zwykle przez określenie trajektorii punktu zerowego momentu i układu wielokątów podparcia), generację trajektorii punktów istotnych w przestrzeni zadania (kartzjańskiej) oraz obliczenie trajektorii w zmiennych złączowych. Co więcej cały proces musi być ujęty w spójny system sterowania zdolny do realizacji wygenerowanych trajektorii złączowych oraz do reakcji na ciągłe interakcje robota z otoczeniem. Autor podjął się realizacji całego tego zadania, czerpiąc oczywiście ze znanych i sprawdzonych rozwiązań, w kilku miejscach twórczo je modyfikując oraz integrując do postaci wieloagentowego systemu sterowania. W literaturze przedmiotu spotykamy właściwie dwa podejścia do konstrukcji robotów kroczących: bazujące na sztywnym łańcuchu kinematycznym i zewnętrznych czujnikach mierzących kontakt z otoczeniem oraz wprowadzające podatności w strukturze łańcucha kinematycznego (naturalne lub wynikające ze sterowania) i wykorzystujące informacje o stanie tych złączy do realizacji chodu. Praca mieści się w tym pierwszym obszarze, choć Autor zwraca uwagę na zalety tych drugich rozwiązań. Z kolei w obszarze stabilizacji chodu dynamicznego klasycznym podejściem jest znana od pół wieku metoda ZMP, choć w nowszych badaniach wykorzystywane są także metody uczenia maszynowego. Właśnie klasyczne podejście, z użyciem w dalszych krokach Preview Control i Closed Loop Inverse Kinematics, zastosowano w recenzowanej pracy.

Podsumowując te wstępne uwagi, stwierdzam, że rozprawa inż. Maksymiliana Szumowskiego podejmuje bardzo przyszłościową, ważną i trudną tematykę. Rozważany

problem z całą pewnością można uznać za aktualne zagadnienie naukowe w obszarze automatyki i robotyki oraz w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika. Autor przeprowadził właściwe studia literaturowe, zaproponował odpowiednią architekturę systemu sterowania dla robota, samodzielnie rozszerzył znane wcześniej wyniki teoretyczne oraz wykonał szereg badań eksperymentalnych algorytmów zaimplementowanych na trzech rzeczywistych robotach humanoidalnych. Aspekt praktyczny jest wart podkreślenia, gdyż poza teoretycznym rozwiązaniem problemu bierze pod uwagę cały szereg ograniczeń technicznych, środowiskowych i trudności implementacyjnych.

2. Ocena zawartości rozprawy

Układ pracy jest logiczny i spójny. Podział treści jest właściwy i ściśle podporządkowany uzasadnieniu tezy rozprawy, która została sformułowana 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.

Dodatkowo Autor wskazał 5 szczegółowych i logicznych założeń jakie stworzony przez niego system musi spełnić:

- ruch opracowany z wykorzystaniem uproszczonego modelu dynamiki z dodatkowym członem opisującym obciążenie testowany będzie z wykorzystaniem robota płaskiego o 8 stopniach swobody,
- testowanie rozwiązania problemu redundancji realizowane będzie z wykorzystaniem robota o 18 stopniach swobody,
- generowanie prymitywów ruchowych odbywa się w trybie offline, ale zakłada się możliwość pracy 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 oraz pomija specyfikację działania interfejsu człowiek-robot.

Teza jest oryginalna i świadczy o znajomości aktualnych badań naukowych dotyczących planowania i generowania ruchu robotów humanoidalnych. Wykazuje też, że Autor potrafi formułować nowe, ambitne zadania badawcze oraz dążyć do ich co najmniej zadawalającego rozwiązania.

Praca zawiera wprowadzenie (nieco bardziej ogólne), 6 zasadniczych rozdziałów i wnioski. Większość rozdziałów (poza 3 i 7) ma podobnie zorganizowaną strukturę z krótkim wstępem na początku i podsumowaniem jego treści na końcu, co dobrze porządkuje wiedzę. Literatura obejmuje 165 trafnie dobranych pozycji, i niemal wszystkie są cytowane w rozprawie. Należy odnotować, że inż. Szumowski jest współautorem 6 przywołanych artykułów (w tym jednego opublikowanego w czasopiśmie z IF).

We wprowadzeniu Autor kreśli nieco szersze spojrzenie na robotykę w kontekście pytania dlaczego warto rozwijać roboty humanoidalne. Pokazuje z jednej strony ewolucję manipulatorów przemysłowych w stronę cobotów, z drugiej duży potencjał ekspansji robotów kroczących w różnych środowiskach, z trzeciej rosnące zapotrzebowanie na roboty asystujące. W konkluzji stwierdza, że właśnie roboty humanoidalne posiadają kilka unikalnych cech (czytelnie zestawionych w tabeli opracowanej na podstawie kilku pozycji literatury), które zaspokajają potrzeby odbiorców w tych trzech obszarach, a zatem należy zwiększać ich możliwości operacyjne i szanse praktycznego zastosowania.

Obszar badawczy jest dalej doprecyzowany w rozdziale drugim, który stanowi także swego rodzaju kompendium wiedzy. Ponieważ synteza ruchów dynamicznych robota humanoidalnego obejmuje kilka zagadnień są one omówione w uporządkowany sposób: od opisu wzorca chodu, poprzez sposoby modelowania kinematyki i dynamiki robota, po sposoby generowania ruchu (wykorzystujące kryterium ZMP i alternatywne). Podając podstawowe teorie Autor zwraca uwagę na przyjęte dalej ograniczenia wynikające z założenia chodu powolnego po płaskim podłożu. Stosuje uproszczenie eliminujące fazę przetaczania pięta-palce z wzorca oraz strukturę łańcucha kinematycznego rozpoczynającą się w stopie podporowej. Dalej szczegółowo omawia kilka typowych modeli uproszczonych dynamiki bipedów oraz przykłady literaturowe ich stosowania. Kluczowe dla generowania stabilnego chodu jest określanie położenia punktów zerowego momentu i w tym zakresie omówiono kilka znanych metod: z wykorzystaniem czujników oraz bazujących na modelu dynamiki (pełnym i uproszczonym) – choć są to metody uznawane za klasyczne brak jest wyraźnego odniesienia do źródeł literaturowych. Dalej przytoczono przykłady z artykułu [111] dotyczące planowania ruchów w przypadku pojawienia się zewnętrznych oddziaływań na robota co może stanowić rozszerzenie metody ZMP. Przedstawiono także szerszą analizę literaturową w zakresie generowania ruchu bipedów z wykorzystaniem naśladowania ruchów człowieka oraz wykorzystania metod sztucznej inteligencji. Autor zwraca uwagę na brak w literaturze opisu całościowego systemu planowania i generowania chodu oraz uwzględniania pewnych aspektów aplikacyjnych co staje się celem jego dalszych rozważań.

Autor wskazuje na możliwość uwzględnienia w uproszczonych modelach robota humanoidalnego dodatkowych obciążeń wynikających z warunków pracy oraz na ryzyko i potencjał redundancji struktury kinematycznej. Z jednej strony redundancja może prowadzić do nieprzewidzianego kształtowania postury robota, z drugiej może być wykorzystana do minimalizacji wymaganych momentów napędowych. Efektem tych rozważań jest sformułowanie w rozdziale trzecim tezy rozprawy i wspomnianych wcześniej założeń.

Kolejny rozdział to szczegółowe przedstawienie specyfikacji systemu sterowania, który bazuje na strukturze wieloagentowej oraz wykorzystuje metodę generowania prymitywów ruchowych. Wybrana architektura pozwala na łatwą implementację na różnych robotach (komputerach) oraz tworzenie systemów rozproszonych. Ma to istotne znaczenie w związku z opisanymi w pracy testami kilku robotów humanoidalnych oraz dekompozycją niektórych zadań do realizacji offline i/lub przez odrębne komponenty systemu (np. moduł wizyjny obserwujących scenę robotyczną). O ile koncepcja systemu agentowego jest dobrze udokumentowana w literaturze (i porządkuje logikę działania), o tyle szczegółowa implementacja jest autorskim dziełem Doktoranta – wyróżnił on 4 agenty, z których dwa są

wprost związane z planowaniem i realizacją ruchu: (a2) *planning agent* i (a1) *motion agent*, zaś dwa pozostałe pełnią bardziej usługową rolę: (a3) *localization and mapping agent* oraz (a4) *user interface agent*. Dla każdego z nich Autor zdefiniował struktury wejść, wyjść i pamięci wewnętrznej podsystemów oraz zachowania przypisane podsystemom. Działania realizowane w ramach zachowania mają formę automatu skończonego. W przypadku *motion agent* podsystemy realizują trzy zachowania: związane z realizacją scenariusza, realizacją prymitywu ruchowego oraz monitorowaniem przeszkód. W przypadku *planning agent* są to cztery zachowania: oczekiwanie na zadanie, zapytanie o pozycję obiektów, generowanie scenariusza ruchowego oraz monitorowanie realizacji scenariusza. Algorytmy będące podstawą działania tych agentów są szczegółowo omówione w kolejnych rozdziałach. *Localization and mapping agent* został wykorzystany w jednym z eksperymentów z planowaniem ruchu robota humanoidalnego pod nadzorem zewnętrznego systemu wizyjnego.

Rozdział piąty zawiera opisy algorytmu wyszukiwania ścieżki oraz modułu generowania ruchu stanowiących podstawę działania odpowiednio agenta a2 i agenta a1. Ścieżka ruchu lub scenariusz ruchowy to sekwencja prymitywów realizujących określone zadanie. Autor pokazał szczegółowy opis (w kilku wersjach) algorytmów tworzenia grafu i poszukiwania najszybciej realizowalnej ścieżki – stosując dwa sposoby wyboru kolejnych węzłów oraz inklinację do celu lub jej brak. Ciekawym pomysłem jest użycie heurystyki A* jako alternatywy dla normy euklidesowej do określania najbliższego węzła. W zakresie tworzenia ogólnej koncepcji modułu generowania ruchu Autor przedstawił cały cykl projektowy od określenia zadań, jakie robot ma wykonywać, poprzez zaplanowanie kroków i trajektorii punktów charakterystycznych zgodnie z opisami z rozdziału 2, aż po rozwiązanie zadania odwrotnego kinematyki dla złączy robota humanoidalnego. Poza określeniem trajektorii punktu zerowego momentu i środka masy, które powtarzają się dla wszystkich zadań, występują różne dodatkowe punkty charakterystyczne właściwe dla zadań kopnięcia piłki lub przenoszenia obiektu. Wybór punktów charakterystycznych oraz sposób określania wymaganych zmiennych stanowią istotę algorytmów i decydują o spójności systemu sterowania. Autor przedstawia także schematy blokowe modułu generowania ruchu dla wersji online i offline co spełnia jedno z założeń tezy rozprawy.

Szczegółowe omówienie metody generowania ruchu następuje w kolejnym rozdziale. Zależności analityczne, grafy przemieszczeń nóg oraz przebiegi trajektorii punktów charakterystycznych klarownie opisują działanie modułu i wykorzystanie prymitywów ruchowych. Autor zwraca uwagę na ryzyko wystąpienia sytuacji konfliktowych lub kolizyjnych i proponuje rozwiązania. Propozycja rozbudowy modelu cart-table o dodatkową ciągniętą masę daje dokładniejszy opis stanowiska badawczego stworzonego przez Doktoranta z robotem humanoidalnym LEM 1. Z kolei dla robota LEM 2 Autor stosuje podwójny model cart-table. To modelowanie w połączeniu ze sterowaniem Preview Control daje dobre efekty generowania i śledzenia trajektorii środka masy robota. Do rozwiązania odwrotnego zadania kinematyki Doktorant stosuje różne podejścia dla robotów LEM 1 i LEM 2 – w pierwszym przypadku znajduje rozwiązanie analityczne, zaś w drugim stosuje metodę Closed Loop Inverse Kinematics. Redundancja robota LEM 2 wprowadza niejednoznaczność rozwiązań, która jest wykorzystana w dodatkowym zadaniu optymalizacyjnym do minimalizacji momentów napędowych w złączach.

Opracowane algorytmy są poddane rozbudowanym eksperymentom opisanym w rozdziale 7. Autor wykorzystuje dwie platformy własnej konstrukcji oraz robota Melson z koła naukowego działającego na macierzystym wydziale. Dla wszystkich urządzeń zestawiono odpowiednie parametry liczbowe i schematy kinematyczne pozwalające na budowę modeli matematycznych oraz zaproponowano zadania testowe nawiązujące do czynności wykonywanych przez podobne roboty podczas kilku konkursów robotycznych serii RoboCup. Dla wybranych zadań Autor określił 11 prymitywów ruchowych zestawionych w trzy rodzaje: związane z chodem, ruchem końcówki stopy i przemieszczaniem dłoni robota. Eksperymenty z robotem LEM 1 pracującym na stanowisku testowym pokazały działanie generatora chodu dla kroków o stałej długości. Przedstawione wykresy oraz sekwencje zdjęć pokazują prawidłowe działanie systemu: gładkie trajektorie łączowe oraz zadowalające odtwarzanie trajektorii ZMP. Pozytywne wyniki uzyskano także dla chodu o zmiennej długości kroku. Kolejne eksperymenty zrealizowano na robocie LEM 2 poruszającym się swobodnie. Zadania chodu ze zmianą orientacji robota oraz kopnięcia piłki zostały wykonane z zachowaniem stabilności postury. Na trzecim robocie przeprowadzono eksperymenty związane z dodatkowymi kryteriami optymalizującymi dołączonymi do rozwiązania odwrotnego zadania kinematyki. Manipulacja wartościami odpowiednich wag w równaniu (6.85) pozwoliła na uzyskanie oczekiwanych celów: kształtowania końcowej postury robota zbliżonej do początkowej oraz zmniejszenia momentów napędowych – choć ten drugi efekt osiągnięty jest kosztem bardzo nienaturalnej pozy. Tutaj nasuwa się pytanie czy stwierdzenie Autora ze str. 101, że „generowanie trajektorii końcówek kończyn górnych w trakcie chodzenia nie jest kluczowe” jest słusznym uproszczeniem. Może odpowiedni ruch rąk dałby lepszy efekt podczas tej optymalizacji. Ostatnim zaprezentowanym testem jest generowanie scenariusza ruchu dla omówionych wcześniej czterech konfiguracji planera. Przykłady pokazują korzystne działanie heurystyki A* oraz inklinacji do celu na czas realizacji ścieżki. W tabeli 7.13 brakuje jednak określenia jednostek czasu co utrudnia ocenę możliwości generowania sekwencji ruchów online. Czy w takim przypadku (online) robot miałby zaczynać realizację sekwencji już po zaplanowaniu kawałka ścieżki czy czekałby na kompletny plan?

Praca jest zakończona zwartym podsumowaniem odnoszącym się do tezy rozprawy i każdego z pięciu założeń oraz wskazującym dalsze kierunki badań.

Za najważniejsze osiągnięcia Autora rozprawy uważam:

- Opracowanie metody generowania ścieżki robota z wykorzystaniem prymitywów ruchowych do pracy online i offline.
- Zaproponowanie kluczowych algorytmów modułu generatora ruchu robota humanoidalnego w tym: wykorzystanie uproszczonych modeli dynamiki – autorsko zmodyfikowanych dla potrzeb posiadanych bipedów oraz modyfikacja algorytmów rozwiązania odwrotnego zadania kinematyki dla potrzeb optymalizacji postury robota i zmniejszenia momentów napędowych złączy.
- Integracja powyższych modułów w spójnej strukturze systemu sterowania bazującego na architekturze wieloagentowej.



- Bardzo cenna jest weryfikacja praktyczna stworzonych algorytmów na autorskich robotach humanoidalnych. Bipedy zachowywały się w sposób wynikający z algorytmu – tym samym Autor wykazał nie tylko analityczne rozwiązanie problemu ale także praktyczną aplikację niezwykle wartościową dla nauk inżyniersko-technicznych.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

1. Najważniejsza uwaga krytyczna dotyczy zaniedbań w redakcji językowej (błędy gramatyczne i stylistyczne) i korekcie (literówki, pozostawione komentarze, powtórzenia, różne skale rysunków), które psują końcowy odbiór tej wymagającej dużego wysiłku pracy badawczej i konstrukcyjnej.
2. Brak konsekwencji w orientacji układu współrzędnych względem kierunku ruchu robota – czasem ruch do przodu jest w kierunku osi x , czasem y .
3. We wzorach (2.38), (2.39) zniknęły składniki momentów sił pochodzących od bezwładności – skąd takie uproszczenie?
4. Dlaczego na Rys 4.3 *Force sensors* są w grupie $e_{1,1}$ a nie w grupie $r_{1,1}$?
5. Czy we wzorze (6.12) w liczniku jest indeksowanie po i czy p ? W tym wzorze nie ma współczynników aktywacji a_i , o których mowa w ostatnim zdaniu na dole str. 98.
6. Pod wzorem (6.17) czytamy: „Parametryzacja, poprzez wykorzystanie współczynników a_i ” – czy mowa o tych samych współczynnikach co w uwadze 5?
7. Reguła trzecia dotycząca czasu trwania podparcia (str. 96) wydaje się niespójna z Rys. 6.2 – wymaga aby sekwencje dwu faz jednopodporowych tej samej nogi nie występowały po sobie, tymczasem złączenie takich prymitywów jak na Rys. 6.2 spowoduje właśnie taką sekwencję.
8. Czy kąt α_{supi} na Rys. 6.3 jest zorientowany?
9. W zdaniu na str. 99 czytamy: „W implementowanym rozwiązaniu, przyjęto chód po płaskim terenie, dlatego orientacja stopy jest zawsze równoległa do podłoża” tymczasem dla przypadku pokazanego na Rys 6.6 prawa stopa nie jest równoległa do podłoża.
10. W podpisach Rys. 6.7 i 6.8 są inne oznaczenia niż na wykresach.
11. We wzorze $|\mathbf{F}_{gan}| = m_{gan} \ddot{x}_{gan}$ na str. 104 powinna być chyba współrzędna y .
12. Podpis pod Rys. 6.12 jest niespójny z oznaczeniami na schemacie blokowym.
13. Na Rys. 6.15 określono zmienną $\theta_T^0 = 0$ czy to jest arbitralna wartość, czy jakoś dobierana, na co wpływa?
14. We wzorze (6.28) użyto innych symboli niż wcześniej – m_{sup} .
15. Dlaczego na Rys. 7.18 są takie długie sekwencje dwupodporowe?

16. Bardzo często stosowanym obecnie środowiskiem implementacji aplikacji robotycznych jest Robot Operating System, oferujący bardzo wiele gotowych komponentów, zwłaszcza z obszaru planowania ruchu i sterowania wysokopoziomowego. Dla obszaru poruszanego w pracy odpowiednim komponentem może być humanoid_navigation. Czy jego możliwości mogą być porównane z osiągniętymi przez Autora lub czy stworzone algorytmy mogłyby zostać włączone do ROS?

4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Wymienione uwagi mają głównie charakter edycyjny i dyskusyjny, i nie umniejszają podstawowych zalet rozprawy, które wymieniłem w pkt. 2. Z pełnym przekonaniem uważam, że inż. Maksymilian Szumowski wykazał się odpowiednimi umiejętnościami prowadzenia pracy naukowej (w tym stosowania metod analitycznych i eksperymentalnych) w dyscyplinie automatyka i robotyka a w nowej klasyfikacji automatyka, elektronika i elektrotechnika. W mojej ocenie, zawartość merytoryczna przedstawionej rozprawy **spełnia wymagania** stawiane przez art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z dnia 21.06.2016r, poz. 882).

