

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Wolińskiego na temat „Optimal Trajectory Planning for Redundant Manipulators Working in a Dynamic Environment”

(Opinia niniejsza została przygotowana na zlecenie Dziekana Wydziału
Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej)

1. Przedmiot rozprawy

Planowanie ruchu manipulatorów redundantnych w dynamicznie zmieniającym się środowisku jest aktualnym zagadnieniem naukowym, rozwijanym przez szereg zespołów pracujących w ośrodkach naukowych w różnych krajach. Biorąc pod uwagę jedynie publikacje zeszłoroczne zgromadzone w bibliotece cyfrowej IEEE Explore można znaleźć ponad 35 artykułów na ten temat – a był to rok wyjątkowo trudny dla globalnej społeczności. Planowanie ruchu manipulatorów jest bardzo złożonym i wielopoziomowym działaniem, które obejmuje: planowanie zadania, określenie trajektorii końcówki w przestrzeni zadania (kartezjańskiej) oraz planowanie trajektorii w zmiennych złączowych. Ten ostatni etap jest szczególnie trudny gdyż wymaga rozwiązania odwrotnego zadania kinematyki, które zazwyczaj jest niejednoznaczne, a w przypadku manipulatorów redundantnych rozwiązań może być nieskończenie wiele. Ta nadmiarowość daje dodatkowe możliwości zwinnej manipulacji lub pracy w przestrzeniach z przeszkodami, ale stanowi wyzwanie z zakresu optymalizacji. Właśnie ten etap planowania trajektorii z uwzględnieniem dodatkowych ograniczeń i celów jest tematem recenzowanej rozprawy. Można zaobserwować dwa zasadnicze podejścia w planowaniu trajektorii złączowych manipulatorów redundantnych: dwuetapowe – gdzie najpierw trajektoria złączowa jest otrzymywana z rozwiązania zadania kinematyki odwrotnej, a później uwzględniane są ograniczenia – oraz jednoetapowe – gdzie zadania kinematyki odwrotnej i skalowania trajektorii połączone są w jedno zagadnienie optymalizacyjne lub planowanie następuje z wykorzystaniem narzędzi sztucznej inteligencji. To drugie podejście wykorzystujące optymalizację zostało zastosowane przez Doktoranta i rozwinięte w postaci autorskich algorytmów bazujących w pewnej mierze na artykułach [54] i [56]. Należy zwrócić uwagę, że zastosowanie w ocenianej pracy horyzontu predykcji zapewnia istotne przewagi stworzonych algorytmów: z jednej strony pozwala na zastosowanie skalowania trajektorii tylko w tym horyzoncie, a z drugiej zapewnia wystarczająco krótki czas obliczeń dla pracy w czasie rzeczywistym. Ponadto, jedna część rozprawy dotyczy identyfikacji parametrów modelu dynamiki robota Kuka LWR 4+, który jest główną platformą testową. Stworzony model jest niezbędny do badań symulacyjnych i wraz z całym oprogramowaniem stanowi o dużej przydatności rozprawy w naukach inżynieryjno-technicznych.

Podsumowując te wstępne uwagi, stwierdzam że rozprawa mgr inż. Łukasza Wolińskiego podejmuje bardzo 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, a do jego rozwiązania potrzebne były studia literaturowe (przeprowadzone w sposób właściwy), samodzielne rozszerzenie znanych wcześniej wyników teoretycznych oraz wykonanie szeregu testów symulacyjnych i badań eksperymentalnych nowo opracowanych algorytmów na rzeczywistych manipulatorach Kuka LWR 4+. Aspekt praktyczny jest szczególnie wart podkreślenia, gdyż uwzględnia nie tylko teoretyczne rozwiązanie problemu ale bierze pod uwagę cały szereg ograniczeń technicznych 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:

Simultaneous solution of the inverse kinematics problem and scaling of the end effector trajectory in a predictive horizon (formulated as a quadratic programming problem) allows to plan an optimal joint trajectory for redundant robots in real time.

Dodatkowo Autor wskazał 7 szczegółowych założeń jakie stworzony przez niego algorytm musi spełnić:

- oblicza trajektorie złączowe na podstawie żądanej trajektorii efektora,
- wykorzystuje redundancję manipulatora do realizacji dodatkowych zadań,
- spełnia ograniczenia na zmienne złączowe,
- spowalnia ruch tylko gdy jest to konieczne,
- wprowadza horyzont predykcji,
- pracuje w czasie rzeczywistym (krok obliczeń nie przekracza 10 ms),
- zapewnia rozwiązanie optymalne (według funkcji celu: najlepsza realizacja zadań dodatkowych przy najmniejszym możliwym skalowaniu ruchu).

Teza jest oryginalna i świadczy o bardzo dobrej znajomości aktualnych badań naukowych dotyczących optymalnego planowania trajektorii manipulatorów redundantnych w czasie rzeczywistym. Wykazuje też, że Autor potrafi formułować nowe, ambitne zadania badawcze oraz dążyć do ich co najmniej zadawalającego rozwiązania.

Praca została podzielona na 6 zasadniczych rozdziałów i wnioski, oraz zawiera 3 załączniki z materiałami dodatkowymi. Każdy rozdział ma dobrze zorganizowaną strukturę z krótkim wprowadzeniem na początku i podsumowaniem jego treści na końcu, co wygodnie porządkuje wiedzę. Literatura obejmująca 148 pozycji jest bardzo trafnie dobrana, i niemal wszystkie zestawione publikacje są cytowane w rozprawie. Należy odnotować, że mgr Woliński jest współautorem 6 przywołanych artykułów (w tym jednego opublikowanego w czasopiśmie z IF) i samodzielnym autorem dwóch publikacji. Według bazy ORCID jest autorem jeszcze dwóch publikacji z IF niecytowanych w rozprawie.

W pierwszym rozdziale rozprawy Autor przedstawia ogólne spojrzenie na zagadnienie planowania ruchu manipulatora z nadmiarowością złączy oraz zaznacza praktyczną potrzebę stworzenia algorytmów działających w czasie rzeczywistym i pozwalających na modyfikacje trajektorii w dynamicznie zmiennym środowisku. Wyjaśnia także znaczenie optymalności rozwiązania w kontekście tej pracy.

Obszar badawczy jest dalej doprecyzowany w rozdziale drugim – dotyczy dwóch zasadniczych celów: rozwiązania zadania odwrotnego kinematyki manipulatora redundantnego oraz wprowadzenia dodatkowych ograniczeń na zmienne złączowe (wynikających z zakresów tych zmiennych, unikania kolizji lub warunków zatrzymania). Autor zwięźle wprowadza czytelnika w aktualny stan nauki pokazując znane z literatury światowej podejścia do problemu. Przybliża dwa podejścia do rozwiązania problemu wspomniane przez mnie w części pierwszej recenzji, choć nie wspomina o publikacjach korzystających z metod sztucznej inteligencji.

W rozdziale trzecim następuje sformułowanie tezy rozprawy i wspomnianych wcześniej założeń. Autor wskazuje znane z literatury rozwiązania, które były inspiracją do prowadzonych badań, i które zostały w istotny sposób rozwinięte w celu udowodnienia tezy rozprawy. Towarzyszy temu ciekawe podsumowanie wcześniejszych badań i poszukiwań naukowych, które nie przyniosły oczekiwanych efektów i zostały porzucone.

Kolejny rozdział to szczegółowe przedstawienie rozwiązania problemu i opracowanie algorytmu nazwanego OOPTP (od angielskiej nazwy Online Optimal Predictive Trajectory Planner), zawiera wyprowadzenie niezbędnych wzorów i klarowny zapis samego algorytmu w pseudokodzie. Autor rozpoczyna od wprowadzenia czasu wirtualnego (pozwalającego na późniejsze skalowanie trajektorii) do opisu kinematyki manipulatora, a następnie zadanie kinematyki odwrotnej zostaje przedstawione jako problem optymalizacji wielokryterialnej podążając za wspomnianymi przykładami z literatury. Realizacja zadanej trajektorii kartezjańskiej pojawia się jako element równościowy, zaś, ograniczenia zmiennych złączowych pojawiają się jako elementy nierównościowe funkcji celu, przy czym Autor szczegółowo analizuje ograniczenia prędkościowe, na przyspieszenia i momenty napędowe. Funkcja celu w bardziej ogólnym sformułowaniu tego problemu programowania kwadratowego może zawierać wiele dodatkowych zadań (o przypisanych wagach), które tworzą odpowiednie hierarchie. Do rozwiązania problemu zastosowano gotowe narzędzia z pakietu qpOASES. Kolejnym ważnym elementem wyprowadzenia i wyróżnikiem stworzonego algorytmu jest wprowadzenie horyzontu predykcji, przy czym zastosowano redukcję liczby przyszłych stanów wymagających wyliczenia w stosunku do całej długości horyzontu. O ile sama idea tej redukcji jest zrozumiała o tyle wybór liczby i numerów takich stanów w późniejszych eksperymentach nie jest jasny. Podsumowując rozdział Autor szczegółowo określa różnice pomiędzy swoim podejściem a podobnymi dostępnymi w literaturze, pokazując zalety i ograniczenia OOPTP.

Rozdział piąty to wspomniane wcześniej przedstawienie platformy sprzętowej oraz procesu identyfikacji parametrów modelu dynamiki robota Kuka LWR 4+. Choć Autor bazuje tu na dostępnej w literaturze procedurze rekursywnego modelowania dynamiki, wprowadza pewne uproszczenia, przygotowuje kompletne środowisko programistyczne i przeprowadza proces

identyfikacji. Stworzony model dynamiczny manipulatora pozwala w kolejnym rozdziale zweryfikować symulacyjnie realizację zaplanowanych za pomocą algorytmu OOFTP trajektorii złączowych, co stanowi bardzo ważny etap przygotowawczy do eksperymentów z rzeczywistymi robotami. Ten aspekt inżynierski pokazuje także praktyczną przydatność rozprawy.

Opracowane algorytmy są poddane rozbudowanym testom symulacyjnym i eksperymentom opisanym w rozdziale 6. Autor porównuje działanie podejścia klasycznego rozwiązania zadania odwrotnego kinematyki z wykorzystaniem Jakobianu (według opisów z rozdziału 2) z działaniem autorskiego algorytmem OOFTP (według opisów z rozdziału 4). Kampania testowa rozpoczyna się od określenia parametrów startowych obu algorytmów i w pierwszej kolejności realizacji tylko zadania głównego, czyli wygenerowania trajektorii złączowych dla określonej trajektorii kartezyjskiej – jedynie zmiana położenia efektora stanowi zadanie. Opis testu, użyte wzory, uzyskane wyniki i ich analiza są przedstawione w bardzo rzeczowy i przekonujący sposób. Zakres prezentowanych danych i ich forma są poprawne. Już w pierwszym teście widoczna jest przewaga algorytmu OOFTP – wbudowany w funkcję celu warunek ograniczenia zmiennych złączowych zapewnia ich spełnienie bez zadań dodatkowych. Co więcej ograniczenia mogą być różne dla każdego złącza. Ich brak w klasycznym podejściu powoduje przekroczenie limitów przyspieszeń. Utrzymanie tych limitów przez nowy algorytm okupione zostało przeskalowaniem trajektorii i nieco dłuższym ruchem manipulatora – co jest zgodne z oczekiwaniami. Koszt obliczeniowy algorytmu OOFTP jest także większy niż metody klasycznej (ale wciąż z dużym zapasem mieści się w przyjętym limicie 10 ms) i większe są błędy odtworzenia trajektorii kartezyjskiej. Kolejne testy obejmują wprowadzanie zadania dodatkowego i wskazanie odpowiednich formuł matematycznych, pierwsze takie zadanie wprowadza limity na zmienne (położenia złączy) w podejściu klasycznym. Wprowadzenie unikania kolizji z przeszkodą przez manipulator stanowi kolejne zadanie dodatkowe. Obie metody radzą sobie z tym zadaniem, jednak efekt uzyskany przez autorski algorytm daje znacznie większy odstęp. Kolejne zadanie sprawdza radzenie sobie obu podejść z osobliwą konfiguracją manipulatora – OOFTP radzi sobie lepiej uzyskując mniejsze błędy odtwarzania trajektorii kartezyjskiej, choć czas wykonania ruchu jest większy. Ostatni przypadek zadania dodatkowego to minimalizacja energii kinetycznej manipulatora podczas realizacji trajektorii – został wykonany tylko dla algorytmu OOFTP z uwagi na ograniczenia metody klasycznej. To ciekawe rozwiązanie mogące mieć zastosowanie w przypadku bezpiecznej współpracy z człowiekiem.

Po udanych testach symulacyjnych pierwsze 4 z nich zostały zrealizowane na rzeczywistym robocie pracującym w trybie zadawania pozycji złączy. Brak możliwości wymuszania prędkości lub sterowania momentem oraz dokładność odtwarzania pozycji przez manipulator spowodowały dużo większe błędy śledzenia trajektorii kartezyjskiej (o rząd wielkości większe niż w symulacji), jednak wszystkie próby zakończyły się sukcesem. Każdy z testów i eksperymentów był przeprowadzony 10 razy dla weryfikacji powtarzalności działania. Robot zachowywał się w sposób przewidziany w symulacji i wynikający z algorytmu – tym samym Autor wykazał nie tylko analityczne rozwiązanie problemu ale także praktyczną aplikację.

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

Za najważniejsze osiągnięcia Autora rozprawy uważam:

- Stworzenie algorytmu poszukiwania trajektorii złączowych jako rozwiązania zadania optymalizacji wielokryterialnej – problem programowania kwadratowego, w którym ograniczenia złączowe są bezpośrednio włączone w sformułowane zadanie.
- Dzięki zastosowaniu predykcji w algorytmie możliwe jest skalowanie czasu w minimalnym zakresie niezbędnym do spełnienia warunków optymalizacji zamiast w całym okresie trwania trajektorii przy zachowaniu możliwości pracy w czasie rzeczywistym.
- Bardzo cenna jest weryfikacja praktyczna stworzonych algorytmów i poprzedzająca ją świadoma kampania testów symulacyjna, w której Autor sprawdzał realizowalność stworzonych trajektorii uwzględniając zakresy prędkości, przyspieszeń i momentów.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

1. Bardzo często stosowanym obecnie środowiskiem implementacji aplikacji robotycznych jest Robot Operating System, oferujący bardzo wiele gotowych komponentów, zwłaszcza z obszaru sterowania wysokopoziomowego. Dla obszaru poruszanego w pracy odpowiednim komponentem może być MoveIt. Czy jego możliwości mogą być porównane z osiągniętymi przez Autora lub czy algorytm OOPTP mógłby zostać włączony do MoveIt?
2. Jak dobierane były wagi w macierzy W_i we wzorze (4.20) aby zapewnić odpowiednią hierarchię zadań, jaka to była hierarchia?
3. We wcześniejszym opisie zwróciłem uwagę, że nie jest jasne jak określana jest liczba P elementów horyzontu predykcji oraz ich rozkład w przeprowadzonych testach.
4. Jak może być uwzględniony warunek uniknięcia kolizji manipulatora z samym sobą?

4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Wymienione uwagi mają głównie charakter dyskusyjny i nie umniejszają podstawowych zalet rozprawy, które wymieniłem w pkt. 2. Z pełnym przekonaniem uważam, że mgr inż. Łukasz Woliński wykazał się znakomitymi umiejętnościami prowadzenia pracy naukowej w dyscyplinie automatyka i robotyka a w nowej klasyfikacji automatyka, elektronika i elektrotechnika. W mojej ocenie, zawartość merytoryczna przedstawionej rozprawy spełnia z wyraźnym nadmiarem 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). Praca jest obszerna i bardzo starannie zredagowana, a jej przygotowanie w języku angielskim daje szansę na cytowania ważne dla rozwoju kariery naukowej Autora.



