

prof. dr hab. inż. Ignacy Duleba  
Katedra Cybernetyki i Robotyki  
Wydział Elektroniki, Politechnika Wrocławska  
ignacy.duleba@pwr.edu.pl

Wrocław 2021-08-20

**Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgra inż. Łukasza Wolińskiego  
"Optimal Trajectory Planning for Redundant Manipulators Working in  
Dynamic Environment".**

0. Podstawa prawna.

recenzję wykonano na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej, prof. dra hab. inż. Tomasza Stareckiego, zgodnie z uchwałą Rady z dnia 29.06.2021, powołującej mnie na recenzenta w przewodzie doktorskim mgra inż. Łukasza Wolińskiego.

1. Charakterystyka ogólna.

Przedłożona do recenzji rozprawa należy tematycznie do robotyki, a zgodnie z klasyfikacją obowiązującą w czasie wszczęcia przewodu (przed 30.04.2019) do dyscypliny automatyka i robotyka. Robotyka jest ze swej istoty interdyscyplinarna, więc o przypisaniu do konkretnej dyscypliny decyduje uwypuklenie wiodącego aspektu rozprawy. Recenzowana dysertacja dotyczy algorytmicznych aspektów planowania trajektorii robotów stacjonarnych o strukturze szeregowej, więc przynależy do dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika i w teście należy sytuować jej osiągnięcia.

W rozprawie doktorskiej Autor podjął się zbadania klasycznego zadania planowania trajektorii robotów stacjonarnych, rozważanego wieloaspektowo w literaturze robotycznej od kilku dziesięcioleci. Unikanie osobliwości, unikanie kolizji z przeszkodami, spełnienie ograniczeń pozycyjnych, prędkościowych, przyspieszeniowych w przestrzeni konfiguracyjnej są aspektami najczęściej rozważanymi w tym kontekście. Niełatwo jest więc w tej tematyce wnieść oryginalny wkład, zatem Autor musiał wykazać się znajomością bogatej literatury przedmiotu oraz znaleźć niszę na twórczą inwencję. Wkładem własnym Autora jest rozwiązanie zadania w środowisku dynamicznym, co oznacza, że ścieżka ruchu jest znana tylko na pewnym (niewielkim) horyzoncie czasowo-przestrzennym. W tym aspekcie wykorzystał klasyczne podejście sterowania predykcyjnego, gdzie predykowana przyszła ewolucja układu służy do wypracowania sygnałów sterujących na kilka taktów sterowania. Dla spełnienia ograniczeń (konfiguracje, prędkości, przyspieszenia) wykorzystał technikę skalowania w dziedzinie czasu, znaną z rozwiązań literaturowych. Klasycznie jednak skalowana jest w etapie drugim już ustalona trajektoria, uzyskana na etapie pierwszym, odpowiadająca zadanej ścieżce efektora manipulatora. Autor uelastycznia skalowanie dopuszczając modyfikację trajektorii w przestrzeni konfiguracyjnej łącząc obydwie etapy. Cechą uzyskiwaną w ten sposób jest możliwość optymalnego planowania trajektorii (w rozwiązaniu klasycznym optymalność gwarantowana na etapie pierwszym może być łatwo tracona na etapie skalowania). Podsumowaniem rozważań teoretycznych jest autorski algorytm optymalnego planowania trajektorii robotów redundantnych w trybie czasu

rzeczywistego. Tryb ów wnosi konieczność ograniczania złożoności obliczeniowej, by z jednej strony zachować wiarygodność wyników, a z drugiej zmniejszać wymiarowość zadania.

Wyróżnikiem pracy jest praktyczność rozwiązania (robot KUKA LWR 4+) i testy na trudnym przykładzie robota o siedmiu stopniach swobody ze znaczną redundancją.

Tematykę rozprawy, choć z elementami klasycznymi w robotyce, uważam za ciągle aktualną i mającą zawsze znaczenie praktyczne.

## 2. Forma i kompozycja rozprawy.

Rozprawa doktorska jest napisana po angielsku i obejmuje 165 stron tekstu podzielonego na siedem rozdziałów głównych, uzupełnionych aneksem (zawierającym materiał pomocniczy), spisem rysunków i tabel. Bibliografia liczy 148 atrybutywnych i współczesnych pozycji traktujących o rozważanych zagadnieniach. Wśród nich znajduje się sześć pozycji Pana Wolińskiego (dwie samodzielne, jedna w czasopiśmie, opublikowane na przestrzeni ostatnich pięciu lat).

W krótkim, liczącym dwie strony, rozdziale 1 Autor przedstawia opisowo potrzebę i znaczenie rozwiązania zadania planowania trajektorii dla robotów redundantnych w środowisku dynamicznym śledzących zadaną ścieżkę w przestrzeni zadaniowej. Rozdział jest przeznaczony głównie dla osób chcących wyrobić pogląd na tematykę, bez wchodzenia w szczegóły techniczne.

W rozdziale 2. przedstawiono niezbędną terminologię i literaturowe metody rozwiązania zadania kinematyki odwrotnej robotów redundantnych metodami bazującymi na jakobianie manipulatora. Szczególną uwagę zwrócono na "zagospodarowanie redundancji" przez optymalizację w przestrzeni zerowej jakobianu z uwzględnieniem drugorzędnych (w stosunku do realizacji ścieżki efektora) zadań, z dyskusją najczęściej stosowanych funkcji kryterialnych konstruowanych dla unikania przeszkód oraz ograniczeń na konfiguracje (miękki sposób, przez karanie przekraczania ograniczeń). Przedstawiono literaturowy sposób priorytetowania zadań dodatkowych, gdy redundancja robota jest odpowiednio duża. Ważnym elementem rozdziału jest przedstawienie dwóch metod skalowania trajektorii: bądź przez parametryzację ścieżki w przestrzeni konfiguracyjnej (gdy ta jest ustalona) lub parametryzacji przez zmianę wirtualnego czasu, dopuszczającego zmianę trajektorii w przestrzeni konfiguracyjnej podczas skalowania.

W rozdziale 3. przedstawiono cele i zakres pracy oraz sformułowano tezę jako możliwość jednoczesnego rozwiązania zadania kinematyki odwrotnej dla zadanej ścieżki efektora wraz z optymalnym skalowaniem wynikowej trajektorii umożliwiającej w trybie czasu rzeczywistego uwzględnienie (w sposób twardy) ograniczeń nałożonych na wektor stanu robota. Szczególnie interesujący jest podrozdział 3.4, w którym Autor prezentuje pierwotną drogę przyjętą w dysertacji oraz jej nieudane realizacje bazujące na literaturowych metodach, które okazały się nieskuteczne dla wielowymiarowych problemów. Wymagały jednak implementacji i testowania do sformułowania konkluzji i przyjęcia dróg alternatywnych.

W głównym, z merytorycznego punktu widzenia, rozdziale 4. sformułowano zadanie kinematyki odwrotnej uwzględniającej ograniczenia w sposób twardy sprowadzając zadanie śledzenia ścieżki efektora do zadania programowania kwadratowego. W zadaniu programowania kwadratowego funkcja jakości zawiera człon karający za zwiększanie energii oraz odstępstwo od liniowego skalowania czasu ruchu, a w części ograniczającej: ograniczenia nierównościowe na śledzenie zadanej ścieżki, spełnienie ograniczeń pozycyjnych, prędkościowych oraz dopuszczenie jedynie zwalniania trajektorii. Optymalizowany wektor składa się z wektora prędkości przegubowych uzupełnionych o jedną zmienną prędkościową odzwierciedlającą skalowany czas. Pokazano także sposób jak ograniczenia na maksymalne prędkości i przyspie-

szenia sformułować w postaci nierównościowych ograniczeń w poszerzonym wektorze zmiennych optymalizowanych. Powyższe zadanie rozważono jednokrokowo, a następnie uogólniono na przypadek predykcyjny (wielokrokowy) przez odpowiednie zwiększenie wymiarowości poszukiwanych danych przy zachowaniu metodologii stosowanej uprzednio. Problem istotnego zwiększenia wymiarowości zadania Autor, by uniknąć zawężenia horyzontu predykcji, rozwiązał przez grupowanie sterowań (kawalkami ciągle na więcej niż jednym takcie sterowania). Podsumowaniem rozdziału jest algorytm wskazujący kompaktowo kolejność wzorów koniecznych do rozwiązania zadania optymalnego planowania trajektorii oraz charakterystyka opisowa zaproponowanej metody rozwiązania. Warto nadmienić, że w sterowaniu predykcyjnym dla rozważanego zadania nie istnieje gwarancja rozwiązania zadania planowania trajektorii w każdych okolicznościach. W przypadkach łatwiejszych może istnieć konieczność relaksacji ścisłej realizacji ścieżki efektora, w przypadkach ekstremalnych – działania awaryjne.

Rozdział 5 zawiera materiał poboczny dysertacji i jest przygowawczym do określenia modelu rzeczywistego robota, na którym przeprowadzone były testy zaproponowanego algorytmu. Rozdział zawiera sposób określenia równań dynamiki manipulatora KUKA LWR 4+ wraz z identyfikacją jego parametrów dynamicznych. Stanowi również dobrą bazę przyszłościowego rozszerzenia zaproponowanej metody planowania ruchu do uwzględnienia najogólniejszej postaci ograniczeń, czyli występujących na poziomie sygnałów sterujących (sił/momentów).

Obszerny rozdział 6 zawiera egzemplifikację zaproponowanego algorytmu na badaniach symulacyjnych i eksperymentalnych dla danych z robota KUKA LWR 4+. Porównano dwie wersje algorytmu: klasyczną (jednokrokową) z predykcyjną (wielokrokową). Brano pod uwagę następujące czynniki: unikanie osobliwości, unikanie przeszkody, spełnienie ograniczeń konfiguracja-prędkość-przyspieszenie, optymalizację energii manipulatora. Do oceny algorytmów przyjęto atrybutywne dane wydajnościowe (czasowe – CPU, normy błędu śledzenia i dane dotyczące kluczowego czynnika skalującego) uśrednione po kilku przebiegach planowań by uwiarygodnić wyniki. Wyniki zaprezentowano w formie wykresów i tabel oraz sformułowano wnioski szczegółowe. Zgodnie z oczekiwaniami algorytm predykcyjny zachowywał się lepiej niż klasyczny, był bardziej czasochłonny, lecz ciągle mieścił się, z zapasem, w granicach jednego cyklu sterowania ( $= 10[ms]$ ), błędy śledzenia ścieżki efektora były akceptowalne praktycznie na poziomie ułamków milimetra. Oczywiście, jak każda metoda predykcyjna, jest również podatna na niedokładności wynikające z przewidywania przyszłości (szczególnie dla długich horyzontów czasowych). Weryfikacja praktyczna potwierdziła przydatność zaproponowanego algorytmu na rzeczywistym robocie, a zwiększenie wartości błędów (głównie w przestrzeni konfiguracyjnej) wynikało z ograniczonych możliwości sterownika robota (dostępne sygnały wyjściowe to konfiguracja i zmierzone momenty). Mankamentem wielu badań robotycznych w skali kraju jest brak w pełni otwartego układu sterowania robotów. Zatem z konieczności badacze muszą dostosowywać się do możliwości oferowanych przez producenta (dość często ograniczających), a własna inwencja w układ sterowania łatwo kończy się brakiem gwarancji produkcyjnej. Ostatni rozdział 7 zawiera podsumowanie głównych osiągnięć dysertacji, po którym następują dodatki zawierające obliczenia pomocnicze.

Dysertacja jest dobrze napisana i zilustrowana, z dbałością o odróżnienie wkładu własnego od zapożyczeń literaturowych. W warstwie programistycznej Autor wykazał się sprawnością implementacyjną (C++) oraz znajomością bibliotek umożliwiających lub ułatwiających implementację autorskiego algorytmu planowania trajektorii. W stosunku do literatury światowej praca wnosi oryginalną metodę planowania trajektorii, choć bazującą na klasycznych komponentach, w warunkach trudniejszych niż klasyczne (zwykle zakładających pełną znajo-

mość śledzonej ścieżki).

### 3. Wyniki uzyskane w rozprawie.

Za oryginalne osiągnięcia Autora uważam:

- Propozycja optymalnego algorytmu planowania trajektorii robotów redundantnych w trybie czasu rzeczywistego śledzącego znaną, na pewnym horyzoncie czasowo-przestrzennym, ścieżkę efektora. Algorytm łączy rozwiązanie odwrotnego zadania kinematyki z metodą sterowania predykcyjnego.
- Połączenie etapu skalowania trajektorii i optymalizacji w jeden proces umożliwiając optymalizację zachowania robota, w odróżnieniu od rozwiązania literaturowego separującego obydwa procesy.
- Przygotowanie do realistycznych badań symulacyjnych wymagające modelowania i identyfikacji robota o wielu stopniach swobody, KUKA LWR 4+.
- Weryfikację symulacyjną i praktyczną algorytmu na wielowymiarowym obiekcie ze znaczną (jak na warunki robotów manipulacyjnych) redundancją.
- Wykazanie empiryczne, że algorytm może być wykorzystywany w trybie czasu rzeczywistego na robocie o siedmiu stopniach swobody.

### 4. Kwestie do dyskusji, komentarze, uwagi polemiczne.

1. Brak jest porównania z metodą skalowania nie dopuszczającą zmiany trajektorii (ciekawym poznawczo byłoby określenie jakiego typu zyski należy oczekiwać ze zmiany sekwencyjnego procesu dwuetapowego na symultaniczny).
2. Warto byłoby dołączyć definicję tworzenia macierzy skośnie-symetrycznej na bazie wektora w  $\mathbb{R}^3$ . Jakkolwiek dla praktykujących robotyków jest operacją znaną, to jednak dla osób spoza branży – już niekoniecznie.
3. Jak ustalać wagi (nie tylko po poszczególnych współrzędnych, ale także po horyzoncie czasowym)? Autor wskazuje empiryczność ich ustalania.
4. Autor dopuszcza jedynie spowolnienie realizacji trajektorii (przyjęcie założenia  $\lambda(t) \leq t$  (np. str. 47 wzór 4.11) ufając, że planer wyższego poziomu, zadający czas, uczynił trajektorię już optymalizowaną. Nie wydaje mi się, że utrudnieniem byłoby uelastycznienie rozwiązania przez dopuszczenie także przyspieszania (tym bardziej, że w warstwie algorytmicznej zmiany wydają się nieistotne) przez przyjęcie ograniczenia  $\lambda \geq 1$  na poziomie np. 1.2 czy parametryzowanym pewnym współczynnikiem.
5. W dysertacji przyjęto stałe ograniczenia położeniowe dla poszczególnych stopni swobody. Dla manipulatora typu ASEA IRb ograniczenia są zależne. Zatem należy w przyszłości uwzględnić także takie praktyczne przypadki dla tych klas robotów.
6. W części symulacyjnej (np. str. 89, kluczowy współczynnik dla skalowania  $\gamma_0$ ) Autor przyjmuje spory zestaw parametrów wpływających na działanie proponowanego algorytmu i koniecznych w badaniach symulacyjnych. Oczywiście ich wartości muszą ważyć jednostkowo czy skalowo niewspółmierne komponenty. Na jakiej zasadzie je dobrano? Czy istnieją heureka ułatwiająca taki wybór (korelacja z krzywizną toru, historią ruchu)?
7. W kontekście ciekawej obserwacji Autora dotyczącej zalecanego ważenia ograniczeń prędkościowych (str.115-120) warto w przyszłości rozważyć zastosowanie także ważenia pseudoodwrotności jacobianu (klasyczna książka Nakamury wskazuje stosowne wzory). Na

pewno nie spowoduje to wzrostu złożoności obliczeniowej algorytmów.

8. Czy były prowadzone badania wpływu długości horyzontu predykcyjnego na jakość rezultatów (np. przy ustalonej wymiarowości wynikowego zadania)?

Przedstawione uwagi czy komentarze mają charakter głównie porządkowy i nie wpływają ani na prawdziwość tezy dysertacji ani na jej rangę naukową.

#### 5. Konkluzja.

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgra inż. Łukasza Wolińskiego wyrażam opinię, że jej Autor wniósł oryginalny wkład do dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika (wg uprzedniej klasyfikacji Automatyka i Robotyka). Problemy naukowe sformułowane w dysertacji w sposób jasny i klarowny, a są one zawsze aktualne i ważne praktycznie. Autor wykazał, że opanował odpowiednio warsztat naukowy, posiada wiedzę i sprawność zarówno na poziomie formułowania i rozwiązywania zadań planowania trajektorii robotów jak ich implementacji i weryfikacji praktycznej. Udokumentowany w rozprawie doktorskiej wkład Autora w rozwój wiedzy (aspekt poznawczy) i możliwości jej potencjalnego zastosowania (aspekt praktyczny) należy uznać za istotny.

Stwierdzam zatem, że **przedłożona do recenzji rozprawa spełnia z nadmiarem wymagania zawarte w ustawie o stopniach i tytułach naukowych oraz stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Wolińskiego do publicznej obrony.**

