

Prof. dr hab. Wojciech MOCZULSKI  
Profesor w Politechnice Śląskiej  
e-mail: wojciech.moczulski@polsl.pl

Gliwice, 30.10.2023

## RECENZJA

### Pracy Doktorskiej

### Pana Mgra inż. Łukasza GRUSZKI

Recenzję przygotowałem na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Pana Prof. Dra hab. inż. Tomasza Stareckiego (pismo z 28.06.2023).

## 1 Wstęp

Robotyzacja procesów wytwarzania jest jedną ze szczególnie szybko rozwijających się technologii Przemysłu 4.0. Roboty przemysłowe, zwłaszcza manipulacyjne, coraz powszechniej wprowadzane są do przedsiębiorstw także w Polsce. Ich implementacja ma wiele zalet, jak zwiększenie wydajności systemów produkcyjnych, precyzji działania, możliwość eliminacji błędów operatorów, a także powiększenie bezpieczeństwa pracy.

Od wielu lat śledzę z dużym zainteresowaniem badania prowadzone w Instytucie Automatyki i Robotyki Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej, zwłaszcza w zakresie rozwoju metod i środków robotyzacji różnorodnych procesów. Rozprawa Pana Mgra inż. Łukasza Gruszki pt. "Nowe podejście do generowania trajektorii robota sześciopięciowego", wykonana pod opieką naukową Pana Profesora Michała Bartysia oraz Promotora Pomocniczego Pana Doktora Dariusza Plichty, stanowi doniesienie naukowe o badaniach z zakresu rozwoju metod generowania optymalnej trajektorii ruchu narzędzia manipulatora o sześciu stopniach swobody ze względu na układ kilku kryteriów optymalizacji, a także przedstawia implementację tej metodyki dla przykładowego robota o 6 stopniach swobody, co nadaje jej charakter wdrożeniowy. Pracy tej dotyczy niniejsza opinia.

## 2 Opis rozprawy

Rozprawa składa się ze streszczeń w językach angielskim i polskim oraz z dwunastu rozdziałów, wykazu oznaczeń, czterech załączników oraz wykazu literatury liczącego 82 pozycje, licząc łącznie 157 stron.

We wstępie (rozd. 1) Doktorant charakteryzuje zastosowanie robotów w różnorodnych procesach, zwracając uwagę na popularność ich wykorzystania w operacjach transportowych “podnieś-odłóż”. Ze względu na rosnące ceny energii elektrycznej, identyfikuje także potrzebę ekonomicznego, ale przede wszystkim energooszczędnego planowania ścieżki i generowania trajektorii ruchu centralnego punktu narzędzia robota (ang. TCP). Zaspokoleniu tej potrzeby poprzez opracowanie odpowiedniej metodyki oraz jej weryfikację dla przykładowego manipulatora o 6 stopniach swobody jest poświęcona dalsza część rozprawy.

W rozdz. 2 zestawiono podstawowe definicje, stosowane w dalszych rozważaniach.

Rozdz. 3 podsumowuje studia literaturowe w zakresie aktualnych metod planowania ścieżki TCP, metod interpolacji i aproksymacji oraz aspektów minimalizacji zużycia energii. W podsumowaniu rozważań Doktorant stwierdza, że nie opracowano dotychczas metodyki planowania ścieżki, uwzględniającej jednocześnie minimalizację czasu trwania ruchu TCP, minimalizację zużycia energii oraz zapewniającej prostą implementację w rzeczywistym środowisku programowym i sprzętowym.

Rozdz. 4 opisuje zakres rozprawy oraz zawiera sformułowanie celu pracy, celu użytecznego (doktorat wdrożeniowy), oraz tezy pracy.

W kolejnym rozdz. 5 liczącym 4 strony zawarto ogólną charakterystykę opracowanej metody.

Rozdz. 6 przedstawia model analityczny, obejmujący zadanie proste i odwrotne kinematyki, model dynamiki robota o 6 obrotowych stopniach swobody, a także zastosowanie tych modeli do obliczeń w odniesieniu do rzeczywistego robota.

W rozdz. 7 opisano podstawowy algorytm tzw. *blendingu wielomianowego*, który może być rozumiany jako sposób generowania ścieżki i trajektorii TCP do zastosowania w zadaniach “podnieś-odłóż”. Pokazano także zastosowanie tego algorytmu do konkretnego manipulatora.

Rozdz. 8 zawiera sformułowanie problemu optymalizacji wielokryterialnej oraz propozycję rozwiązania tego problemu z wykorzystaniem metody sztucznej inteligencji, jaką jest algorytm rojowy.

Rozdz. 9 zawiera opis badań eksperymentalnych z wykorzystaniem manipulatora 6-osiowego posadowionego na platformie mobilnej, który realizował zadania “podnieś-odłóż” w środowisku zbliżonym do rzeczywistego (TRL 6).

Rozdz. 10 to dyskusja wyników uzyskanych z obliczeń przy zastosowaniu opracowanej metodyki oraz ich konfrontacja z wynikami eksperymentu. Sformulowano także liczne wnioski o charakterze szczegółowym.

W rozdz. 11 Doktorant charakteryzuje swój wkład w dziedzinę robotyki, a w rozdz. 12 zawiera ogólne podsumowanie przeprowadzonych badań.

Załącznik A zawiera wyniki obliczeń odwrotnego zadania kinematyki, a załącznik B – odwrotnego zadania dynamiki dla robota ES5. Załączniki C i D zawierają odpowiednio opis wdrożenia oraz opinie przedstawicieli przedsiębiorstw, w których wdrożono metodykę opracowaną przez Doktoranta, co odpowiada wdrożeniowemu charakterowi dysertacji.

Układ pracy doktorskiej jest nietypowy. Nie wyodrębniono w niej spójnego opisu metodyki, a także weryfikację metod rozbito na wiele fragmentów dołączonych do opisu poszczególnych metod. Byłoby także pomocne, gdyby zostały ponumerowane poszczególne wnioski, co ułatwiłoby dyskusję nad nimi. Przyjęty sposób uporządkowania spisu literatury (wg kolejności cytowania w tekście rozprawy), choć czasem stosowany, nie ułatwia identyfikacji publikacji autorstwa lub współautorstwa Doktoranta.

Pewne zastrzeżenia budzi też praczycja niektórych sformułowań, jak np. “trajektoria robota” i in.

### 3 Uwagi dotyczące doboru tematu, celu, tezy i zakresu rozprawy

Temat pracy, jakim jest “nowe podejście do generowania trajektorii robota sześciostopniowego”, dotyczy ważnego problemu z punktu widzenia robotyzacji procesów przemysłowych, jest więc aktualny i istotny ze względów aplikacyjnych.

Cel pracy, którym jest opracowanie “nowego podejścia do zadania projektowania ścieżki i generowania trajektorii [TCP] robota przegubowego o sześciu stopniach swobody do zadań klasy podnieś-odłóż bazujące na rozwiązaniach optymalizacji programistycznej, uwzględniającej lokalizację robota względem przestrzeni zadania transportowego”, a także sformułowany dodatkowo cel użyteczny, którym jest “wdrożenie proponowanego podejścia do serii robotów przegubowych opracowanych i produkowanych w polskich innowacyjnych firmach technologicznych” odpowiada wymogom stawianym przed pracami doktorskimi o charakterze wdrożeniowym.

Teza pracy jest następująca:

*Możliwe jest opracowanie efektywnego i aplikowalnego podejścia do projektowania ścieżki i generowania trajektorii w zadaniach klasy podnieś-odłóż robotów przemysłowych z wykorzystaniem dynamicznej zmiany lokalizacji robota względem przestrzeni zadania transportowego.*

W celu jej wykazania Doktorant opracował odpowiednią metodykę generowania ścieżki i trajektorii TCP, metodykę optymalizacji wielokryterialnej z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji oraz badania symulacyjne i eksperymentalne, a także dokonał wnikliwej analizy uzyskanych rezultatów.

### 4 Ocena merytoryczna

Podjęta przez Doktoranta tematyka badań jest złożona. Cel pracy jest aktualny i ważny ze względu na stale rosnącą liczbę implementacji systemów robotycznych w przemyśle. Zastosowane metody są nowoczesne, a ich implementacja wymagała znajomości odpowiednich środowisk programowych i sprzętowych, a także umiejętności zaplanowania i prze-

przewodzenia badań w środowisku wirtualnym oraz rzeczywistym.

Zakres eksperymentów przeprowadzonych dla różnych parametrów metody jest obszerny, a realizacja każdego z nich, prezentowane wyniki szczegółowe i wnioski udokumentowano w sposób przemyślany i przekonywujący.

Praca jest bardzo interesująca, a problematyka ważka, stąd sprowokowała recenzenta do sformułowania kilku uwag dyskusyjnych, które mogą być zachętą do kontynuacji tych badań i wprowadzenia do nich istotnych nowych jakości.

W dalszej kolejności przedstawiono uwagi dyskusyjne i wybrane uwagi szczegółowe.

## 4.1 Elementy oryginalne

Na podstawie lektury rozprawy i treści rozdz. 11 oceniam, że najważniejszymi jej oryginalnymi elementami są:

1. Metoda blendingu umożliwiająca aproksymację trajektorii z uwzględnieniem odpowiednich ograniczeń;
2. Lokalizacja robota w przestrzeni roboczej bazująca na rozwiązaniu problemu optymalizacyjnego;
3. Przeprowadzenie badań eksperymentalnych na rzeczywistym robocie działającym w środowisku zbliżonym do rzeczywistego.

## 4.2 Uwagi dyskusyjne

1. Kryterium minimalizacji czasu [realizacji] zadania (s83 sekcja 8.2) wydaje się być niewłaściwe. W praktyce przemysłowej robot działa w takt linii produkcyjnej, więc w rozważaniach powinno się ten takt przyjąć jako kryterium ograniczające i minimalizować zużycie energii i być może zużycie podzespołów robota. Doktorant pośrednio potwierdza ten związek na s104 d14-12, stwierdzając, że “kryterium minimalizacji czasu cyklu jest nieefektywne energetycznie”.
2. Koszt amortyzacji to duże uproszczenie składnika kosztowego. Optymalizować powinno się zużycie elementów, koszty przerw w produkcji spowodowane koniecznością naprawy lub wymiany podzespołów itp.
3. W dysertacji do rozwiązania zadania optymalizacji zastosowano algorytm rojowy. Czy jest możliwe wykorzystanie innych algorytmów sztucznej inteligencji w tym celu?

## 4.3 Wybrane uwagi szczegółowe

(s62-63, rys7.2) Doktorant niewłaściwie stosuje nazwę “interpolacja” do postępowania, które ma charakter aproksymacji.

- (s71, tab7.1) Wraz ze wzrostem stopnia wielomianu pojawiają się oscylacje pomiędzy punktami węzłowymi – tym większe, im wyższy stopień tego wielomianu. Jest więc naturalne, że czasy realizacji zadania i konieczna energia do jego wykonania rosną.
- (s93, tab9.3) Wyniki obliczeń składników energii całkowitej i wartości zmierzone podczas eksperymentu są zdecydowanie rozbieżne (np. dla osi 1 - 64% błędu, dla osi 6 – 40% błędu). Proszę o interpretację tych rozbieżności. Należy uznać zgodność wyników sumarycznych za całkowicie przypadkową.

## 5 Wniosek końcowy

Podjęty i rozwiązany przez Doktoranta problem badawczy ma istotne znaczenie dla zastosowań robotów przemysłowych. Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie “Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne” oraz wymaganą umiejętnością zaplanowania i samodzielnego przeprowadzenia badań naukowych.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska Mgr. inż. Łukasza Gruszki pt. “Nowe podejście do generowania trajektorii robota sześciooosiowego” spełnia wymagania Art. 187 p.1 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. “Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dziennik Ustaw 2018 poz. 1668) i może zostać dopuszczona do publicznej obrony przed komisją Rady Naukową Dyscypliny “Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne” Politechniki Warszawskiej.