

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA
RADY DISCYPLINY AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA,
ELEKTROTECHNIKA I TECHNOLOGIE KOSMICZNE
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

Tytuł rozprawy: Nowe podejście do generowania trajektorii robota sześciostopniowego

Autor rozprawy: mgr inż. Łukasz Gruszka

1. Analiza strony merytorycznej rozprawy

1.1. Obszar problemowy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy zagadnień planowania ruchu i w mniejszym zakresie sterowania robotów przemysłowych w zadaniach typu pick-and-place (nazywanych w rozprawie “podnieś-odłóż”, inaczej zadanie transportowe). Główną osią rozprawy jest poszukiwanie efektywnych metod generowania trajektorii punktu centralnego narzędzia robota o sześciu stopniach swobody w zadaniach rozważanej klasy oraz optymalizacja parametrów tych trajektorii wraz ze zmianą lokalizacji podstawy robota w przestrzeni zadaniowej. Celem optymalizacji jest minimalizacja wybranego kryterium związanego alternatywnie z czasem realizacji zadania transportowego, zużyciem energii podczas jego realizacji, lub efektywnością ekonomiczną robota w danym zadaniu.

Za główny cel rozprawy Autor obrał opracowanie uniwersalnej i efektywnej względem wybranych kryteriów metody projektowania ścieżki i generowania trajektorii robotów manipulacyjnych o strukturze przegubowej. Rozprawa została przygotowana w ramach programu “Doktorat wdrożeniowy”, w związku z czym zadanie rozwiązywane przez doktoranta jest dobrze osadzone w potrzebach użytkowników robotów przemysłowych i wymaganiach stawianych takim robotom odnośnie ich szeroko rozumianej efektywności ekonomicznej. Eksperymentalnej weryfikacji opracowanego podejścia do wyznaczania trajektorii dokonana na przykładach zadań typu podnieś-odłóż dla robota ES5 o sześciu stopniach swobody, dla którego opracowano analityczne modele kinematyki prostej i odwrotnej oraz analityczny model dynamiki. Wdrożenia przemysłowego dokonano dla robotów serii ES, w tym w wersji zintegrowanej z autonomiczną platformą mobilną, opracowanych i produkowanych w firmie EasyRobots Sp. z o.o. i we współpracy z firmą Sorter Sp. J, partnerem w programie “Doktorat wdrożeniowy”.

Autor rozprawy podjął się rozwiązania problemów poruszanych w literaturze z zakresu robotyki od dawna. Jednak problemy te jak dotąd nie były rozwiązywane w oprogramowaniu robotów przemysłowych lub były uwzględniane jedynie częściowo, a co za tym idzie, rozwiązania zbliżone do proponowanego w rozprawie nie zostały dotychczas wdrożone w praktyce. Problematyka rozprawy, pomimo silnej motywacji praktycznej, daje także możliwość uzyskania nowych wyników naukowych w zakresie robotyki i automatyzacji produkcji przemysłowej. Zdefiniowane cel pracy i zakres podejmowanych badań uzasadniają twierdzenie, że obszar problemowy rozprawy mieści się w obszarze robotyki, a uwzględniając obecny stan prawny, w zakresie dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

W rozprawie sformułowano tezę (str. 34), mówiącą o możliwości opracowania efektywnego i “aplikowalnego” podejścia do projektowania ścieżki i generowania trajektorii w zadaniach klasy podnieś-

odłów robotów przemysłowych z wykorzystaniem dynamicznej zmiany lokalizacji robota względem przestrzeni zadania transportowego. Teza, pomimo prawidłowej konstrukcji logicznej, nie obejmuje wszystkich zagadnień poruszanych w rozprawie, pomija bowiem problem optymalności wyznaczonych ścieżek, koncentrując się na zmianie lokalizacji robota względem przestrzeni zadania transportowego jako metodzie uzyskania efektywnej ścieżki. Niejasne jest także użyte w tezie pojęcie aplikowalność. Autor nie odnosi się w tezie do jakości uzyskiwanych rozwiązań (trajektorii), która jest mierzalna poprzez parametry działającego systemu z robotem przemysłowym.

Pierwszy rozdział rozprawy stanowi wstęp, zawierający zwięzłe, lecz wystarczające uzasadnienie dla podjęcia tematu badawczego w kontekście potrzeb producentów i użytkowników robotów przemysłowych. Rozdział drugi zawiera definicje ważniejszych pojęć użytych w rozprawie, zarówno dotyczących robotyki, jak i pojęć z zakresu teorii sterowania i matematyki. Rozdział trzeci przedstawia studia literaturowe dotyczące stanu wiedzy w zakresie metod wyznaczania trajektorii narzędzi robotów przemysłowych oraz metod aproksymacji i interpolacji ścieżek, a także zagadnień minimalizacji zużycia energii. Krótki rozdział czwarty przedstawia zakres i cel pracy, zawiera on także tezę rozprawy. Zarys proponowanego podejścia do wyznaczania trajektorii i jej optymalizacji zaprezentowano w rozdziale piątym. Rozdział szósty przedstawia modele analityczne wykorzystywane w opisywanym rozwiązaniu. Są to modele zadania prostego i odwrotnego kinematyki robota, zadania odwrotnego dynamiki robota i zagadnienia wyznaczenia wielkości poboru energii. Należy zauważyć, że szczegółowe wyprowadzenia dotyczące zadania kinematyki odwrotnej oraz modelu dynamiki robota ES5 delegowano do załączników, odpowiednio A i B. Kolejne dwa rozdziały (7 i 8) prezentują najważniejsze nowe koncepcje i metody stanowiące oryginalny wkład doktoranta w rozwój robotyki przemysłowej. W rozdziale siódmym zaproponowano algorytm, który umożliwia łączenie segmentów ścieżki w przestrzeniach zmiennych zewnętrznych i wewnętrznych robota, wyznaczanie trajektorii spełniających kryterium ciągłości dwóch pierwszych pochodnych przemieszczenia względem czasu, oraz wyznaczanie trajektorii o minimalnym czasie realizacji w warunkach ograniczeń wynikających z maksymalnych dopuszczalnych prędkości i przyspieszeń rozwijanych przez napędy robota. Natomiast rozdział ósmy zawiera opis proponowanego podejścia do optymalizacji trajektorii końcówki roboczej, koncentrując się na problemie minimalizacji jednostkowego zużycia energii poprzez optymalne umiejscowienie podstawy robota w przestrzeni realizacji zadania. Kolejny, dziewiąty rozdział rozprawy dotyczy badań eksperymentalnych prowadzonych z użyciem robota ES5 oraz platformy mobilnej AMR wyprodukowanych przez EasyRobots. W trakcie badań zweryfikowano poprawność opracowanego modelu analitycznego zużycia energii i zbadano wpływ zmiany umiejscowienia podstawy robota w płaszczyźnie x, y na czas trwania cyklu transportowego, zużycie energii na jeden cykl transportowy i koszt jednostkowego cyklu pracy. Rozdziały 10, 11 i 12 składają się na podsumowanie rozprawy - zamieszczono w nich dyskusję dotyczącą wyników i wnioski (rozdział 10), opis osiągnięć stanowiących zdaniem doktoranta jego oryginalny wkład w rozwój robotyki (rozdział 11) oraz uwagi odnoszące się do praktycznego znaczenia uzyskanych wyników i ponowne podkreślenie oryginalności proponowanych rozwiązań (rozdział 12). Istotny komponent recenzowanej rozprawy stanowią załączniki. W załącznikach A i B przedstawiono odpowiednio szczegółowe wyprowadzenia analitycznych modeli kinematyki odwrotnej oraz dynamiki dla robota typu ES5. Załącznik C stanowi natomiast dość krótki i niestety mało szczegółowy opis prac wdrożeniowych prowadzonych przez doktoranta we współpracy z firmami Sorter i EasyRobots. Załącznik D to kopie dwóch dokumentów będących pozytywnymi opiniami podmiotów gospodarczych dla których zrealizowano wdrożenia rozwiązań przedstawionych w rozprawie.

Rozprawa zawiera niezbyt obszerną, lecz reprezentatywną dla poruszanej problematyki bibliografię, która w większości przypadków właściwie ilustruje omawiane zagadnienia. Widoczny jest jednak brak pozycji (w tym klasycznych podręczników) dotyczących planowania ruchu robotów, a szczególnie geometrycznego planowania ścieżek.

1.2. Ocena wyników oraz stopnia ich oryginalności

Recenzowana rozprawa dotyczy wyznaczania trajektorii ruchu końcówki roboczej (narzędzia) robota manipulacyjnego o strukturze przegubowej, które to trajektorie, przy istniejących ograniczeniach, mają być optymalne pod względem jednego z rozpatrywanych kryteriów efektywności (tzn. mają minimalizować wartość tego kryterium). Zaprezentowane w rozprawie rozwiązanie tego zagadnienia opiera się na metodzie wyznaczania ciągłych trajektorii dla segmentów ścieżek interpolowanych we współrzędnych zewnętrznych oraz wewnętrznych, a następnie, rozwiązaniu problemu optymalizacyjnego w celu wyznaczenia lokalizacji robota względem przestrzeni zadania, odpowiednio do przyjętego celu optymalizacyjnego. Optymalizacja wykorzystuje uniwersalną, lecz dość prostą i nie zawsze efektywną obliczeniowo koncepcję poszukiwania optymalnych wartości za pomocą algorytmu rojowego (particle swarm optimization - PSO), gdzie jedynymi poszukiwanymi parametrami są wartości przesunięcia podstawy robota względem pozycji początkowej w płaszczyźnie poziomej.

W świetle znanej literatury dotyczącej planowania ruchu robotów manipulacyjnych proponowane rozwiązania można uznać za oryginalne, tym bardziej, że przyjęta koncepcja jest dobrze osadzona w analizie potrzeb w zakresie aplikacji robotów przemysłowych realizujących zadania transportowe. Wśród prezentowanych w rozprawie nowych koncepcji oraz rozwiązań można wyróżnić.

- Nową metodę blendingu trajektorii umożliwiającą łączenie segmentów trajektorii interpolowanych w układach współrzędnych wewnętrznych i zewnętrznych, z uwzględnieniem ograniczeń w obu przestrzeniach.
- Wykorzystanie modelu dynamiki przegubowego robota o sześciu stopniach swobody do estymacji zużycia energii w zadaniu transportowym bez konieczności przeprowadzania badań eksperymentalnych.
- Optymalizację wybranych parametrów pracy robota (czas cyklu, zużycie energii, koszt) przez wyznaczenie najlepszego dla danego zadania położenia początku układu współrzędnych robota.
- Implementację opisanych w rozprawie metod wyznaczania trajektorii i optymalizacji położenia robota w oprogramowaniu EScControl współpracującym z robotami serii ES firmy EasyRobots.

Zauważone niedoskonałości dysertacji dotyczą przede wszystkim powierzchownego opisu niektórych zagadnień, głównie w części opisującej eksperymenty związane z wdrożeniem (Załącznik C). Załącznik ten opisuje trzy aplikacje opisywanych rozwiązań dla stanowisk zrobotyzowanych z robotami serii ES oraz rozwiązanie integrujące robota ES5 z robotem mobilnym (bazą). Nie podano jednak żadnych wyników ilościowych dotyczących opisywanych przypadków, a opisy są po części zbyt ogólne, na przykład nie wiadomo jaki układ jezdny (kinematykę) ma robot mobilny zintegrowany z manipulatorem, który to układ ma decydujący wpływ na możliwość wykonywania precyzyjnych ruchów dostosowujących położenie bazy do wymaganego położenia podstawy manipulatora. Pewne wątpliwości można mieć także co do zakresu uzasadnienia wyciąganych wniosków (Rozdział 10). Niektóre z wniosków nie są poparte przedstawionymi wynikami, np. twierdzenie, że modele oparte na danych są "niepraktyczne" w kontekście realizacji zadań optymalizacyjnych. W przypadku zastosowania metody optymalizacji populacyjnej, takiej jak użyta w rozprawie algorytm PSO możliwe jest wykorzystanie modelu opracowanego na podstawie danych (np. modelu sieci neuronowej) w funkcji określającej wartość przystosowania osobnika do środowiska.

W poniższym zestawieniu zwracam uwagę na dostrzeżone niedostatki merytoryczne i zadaję pytania, na które oczekuję odpowiedzi doktoranta.

1. W rozdziale 3 pominięto analizę klasycznego zadania wyznaczania bezkolizyjnej ścieżki manipulatora, a z tekstu rozprawy nie wynika w sposób oczywisty jak konstruowana jest bezkolizyjna ścieżka w zadaniu transportowym. Wydaje się, że jako wstępne dane wykorzystywana jest ścieżka końcówki robota określona przez operatora, np. metodą uczenia punktów węzłowych. Czy w

związku z tym istnieje możliwość bezpośredniego (bez dodatkowego etapu planowania geometrycznego) wykorzystania opisywanych w rozprawie metod w zadaniach, w których w przestrzeni roboczej mogą wystąpić (znane) przeszkody ?

2. W rozdziale 6 nie jest jasne na jakiej podstawie wyznaczono przebiegi aproksymujące sprawność przekładni w przegubach robota w funkcji momentu obciążenia. Czy tylko na podstawie danych udostępnionych przez producenta w postaci punktów widocznych na Rys. 6.4 ?
3. Istotny dla całej koncepcji rozprawy algorytm optymalizacji za pomocą roju cząstek jest opisany w rozdziale 8 niedokładnie. Brak jest zapisu algorytmu lub schematu blokowego, nie wyjaśniono też roli meta-parametrów c_1 , c_2 i r_1 , r_2 oraz w , a co więcej nie wiadomo jakie wartości tych parametrów zastosowano w opisywanym rozwiązaniu i czy dobór tych meta-parametrów miał wpływ na przebieg optymalizacji. Sposób doboru meta-parametrów algorytmu PSO oraz wrażliwość uzyskiwanych wyników na wartości meta-parametrów wymaga komentarza. Dokładniejszego wyjaśnienia wymaga także użyty warunek stopu, a szczególnie warunek opisany jako “zostanie uzyskane lepsze rozwiązanie w określonej liczbie kolejnych iteracji”.
4. W zawartym w rozdziale 9 opisie badań eksperymentalnych nie jest jasne jaka była struktura siatki 900 punktów pomiarowych w których zbierano dane, podano tylko wielkość komórki 30×30 mm.
5. Pomimo starannego zapisu formuł matematycznych w manuskrypcie nie uniknięto błędów, np. na str. 43 w formule opisującej składową translację macierzy transformacji zamiast nT_0 powinno być ${}^n p_0$.

1.3. Zagadnienia dyskusyjne

Poniższe uwagi dotyczą ogólniejszych kwestii poruszonych w rozprawie i nie odnoszą się bezpośrednio do treści manuskryptu. Oczekuję jednak komentarza doktoranta dotyczącego tych uwag.

1. Jakie algorytmy planowania geometrycznej ścieżki ramienia robota można wskazać jako potencjalnie efektywne w rozważanym zadaniu podnieś-odłóż, zakładając, że w przestrzeni roboczej mogą istnieć znane przeszkody o arbitralnym kształcie ?
2. Czy rozważane były alternatywne względem algorytmu roju cząstek metody optymalizacji nadające się do zastosowania w rozważanym w rozprawie zadaniu ? Jakie rodzaje algorytmów można wskazać jako alternatywę i jak w tym kontekście uzasadniony jest wybór algorytmu roju cząstek ?

2. Analiza strony formalnej rozprawy

2.1. Ocena układu pracy i redakcji manuskryptu

Recenzowana rozprawa doktorska została przygotowana w języku polskim. Obejmuje ona w kolejności: streszczenie w języku polskim, streszczenie w języku angielskim, spis treści, wykaz oznaczeń, dwanaście rozdziałów zasadniczych, bibliografię oraz cztery załączniki, ponumerowane od A do D, przy czym załącznik D to kopie opinii dotyczących wdrożenia wyników badań prowadzonych w ramach doktoratu.

Rozprawa liczy 117 ponumerowanych stron, a załączniki mają odrębną numerację stron. Bibliografia składa się ze 82 pozycji, w tym stron internetowych, uporządkowanych w kolejności cytowania. W rozprawie cytowane są dwie współautorskie prace doktoranta, z których jedna opublikowana została w czasopiśmie “Energies” (pozycja [68]), a druga w materiałach konferencji międzynarodowej (pozycja [82]). Spośród cytowanych pozycji 30 ukazało się w okresie ostatnich pięciu lat (po roku 2018), co świadczy o związkach tematyki rozprawy z nurtem aktualnych badań w zakresie robotyki i automatyzacji

procesów przemysłowych. Bibliografia nie budzi zastrzeżeń od strony merytorycznej i cytowana jest właściwie.

Układ rozprawy jest prawidłowy, chociaż dyskusyjne jest delegowanie opisu wdrożeń do załącznika (Załącznik C). Taki zabieg redakcyjny powoduje, że materiał zawarty w Załączniku C nie stanowi integralnej części rozprawy i nie został uwzględniony w podsumowaniu i wnioskach (rozdziały 10 i 11). Manuskrypt jest starannie opracowany pod względem edytorskim i graficznym. Użyty w rozprawie język i terminologia są właściwe dla poruszanej tematyki, a autor wykazał się starannością konsekwentnie dobierając terminy w języku polskim.

2.2. Uwagi szczegółowe

Tekst rozprawy jest zwięzły i poprawny pod względem stylistycznym. Podczas lektury manuskryptu zauważyłem jedynie pojedyncze błędy językowe lub redakcyjne np.: “w bazowym układzie współrzędnych” (str. 43), “w przestrzeni otoczonej całkowicie przez inną sferą” (str. 64). Także redakcja bibliografii jest staranna. Zauważyć można jedynie pojedyncze błędy redakcyjne, jak w [19] lub niekompletne dane cytowanej pozycji, jak np. w [14].

3. Konkluzja

Uważam, że recenzowana dysertacja Pana mgr inż. Łukasza Gruszki spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim przez art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, ponieważ zawiera oryginalną koncepcję rozwiązania istotnych zagadnień w dziedzinie robotyki. Rezultaty nawiązują do aktualnego stanu wiedzy i mają znaczenie praktyczne wykazane poprzez wdrożenie w firmie Sorter Sp. J. . Uzyskane wyniki w wystarczającym stopniu dokumentują poprawność proponowanych koncepcji i opracowanych rozwiązań oraz korzyści wynikające z ich praktycznego zastosowania. Uwagi krytyczne sformułowane w treści recenzji, po części mające charakter dyskusyjny, nie umniejszają istotnie mojej pozytywnej oceny oryginalności i praktyczności przedstawionych rozwiązań oraz staranności opracowania rozprawy. Sformułowanie problemu badawczego, zaproponowane oryginalne metody jego rozwiązania, sposób przeprowadzenia badań oraz zademonstrowana umiejętność formułowania wniosków świadczą o przygotowaniu doktoranta do pracy naukowej. Na tej podstawie wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Gruszki i o dopuszczenie do jej publicznej obrony.


Piotr Skrzypczyński