

WPLYNĘŁO
2023 -10- 10
dn.....

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Łukasza Gruszki zatytułowanej

„Nowe podejście do generowania trajektorii robota sześćoosiowego”

Recenzja została opracowana na zlecenie z dnia 28 czerwca 2023 r. wystawione przez Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej zgodnie z uchwałą tej Rady z dnia 27 czerwca 2023 r. oraz na podstawie umowy o dzieło z dnia 24.07.2023.

Recenzję wykonano zgodnie z wymogami ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

1. Ocena układu rozprawy doktorskiej

Rozprawa mgra inż. Łukasza Gruszki zatytułowana „Nowe podejście do generowania trajektorii robota sześćoosiowego” została opublikowana na Politechnice Warszawskiej w 2023 r. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Michał Bartyś, prof. Politechniki Warszawskiej, a promotorem pomocniczym dr inż. Dariusz Plichta. Praca została wykonana jako doktorat wdrożeniowy na Politechnice Warszawskiej i w przedsiębiorstwach Sorter Sp. J. i EasyRobots Sp. z o.o.

Rozprawa jest napisana w języku polskim. Dzieło liczy 159 stron, w tym 117 stron tekstu rozprawy oraz 42 strony załączników. Tekst zasadniczy poprzedzony jest podziękowaniami, dwoma streszczeniami (po angielsku i po polsku), spisem treści oraz indeksem skrótów. Główna część rozprawy zawiera 12 rozdziałów oraz wykaz 82 pozycji literatury. Objętość rozprawy jest standardowa dla typu opracowań w dziedzinie nauk technicznych.

We wstępie autor opisał motywacje podjęcia tematu rozprawy ze szczególnym uwzględnieniem aspektów ekonomicznych pracy robotów przemysłowych w realizacji zadań typu podnieś – odłóż.

W rozdziale 2 zatytułowanym „Preliminaria” autor podaje 11 kluczowych definicji pojęć, które będzie wykorzystywał w pracy.

W rozdziale 3 doktorant zawarł studia literaturowe w zakresie tematyki planowania ścieżek i generowania trajektorii robota przegubowego o sześciu stopniach swobody w zadaniach typu podnieś-odłóż. Analizę zakończył podsumowaniem wskazującym na lukę w dotychczasowym stanie wiedzy, którą to lukę zamierza wypełnić swoją pracą.

W rozdziale 4 zawarta jest teza, cel i zakres pracy.

W rozdziale 5 przedstawiono zarys podejścia do rozwiązania postawionego w celu pracy zadania. Umieszczenie w tym miejscu ogólnej struktury podejścia uważam za bardzo trafne i ułatwiające dalszą lekturę pracy.

Rozdział 6 zawiera opis modelu analitycznego niezbędny do rozwiązania postawionego w celu pracy zadania. Opisane są rozwiązania zadania prostego i odwrotnego kinematyki, zadania odwrotnego dynamiki oraz wyznaczanie mocy chwilowej i energii zużywanej w trakcie cyklu pracy. Opisy te są uzupełnione szczegółowymi wyprowadzeniami równań zawartymi w załącznikach A i B. Rozwiązania opisane w tej części nie zawierają elementów innowacyjnych, ale umieszczenie ich w pracy uważam za korzystne – pozwalają szczegółowo prześledzić działania autora, mogą być też wykorzystane przez czytelników do rozwiązywania innych problemów z wykorzystaniem podobnych elementów metodologii. Pewien niedosyt z praktycznego punktu widzenia budzi jedynie brak udostępnienia zweryfikowanego kodu programu realizującego te obliczenia. Zdaję sobie jednak sprawę, że udostępnianie kodu jest raczej praktyką stosowaną w publikacjach z zakresu informatyki, a w przypadku doktoratu wdrożeniowego może napotykać dodatkowe przeszkody związane z prawami autorskimi i ochroną przed konkurencją. Na zakończenie tego rozdziału autor zamieszcza studium przypadku, czyli wartości poszczególnych parametrów i postać równań dla robota ES5 analizowanego w pracy.

Rozdział 7 zawiera pierwszy fragment innowacyjnych opracowań autora, czyli algorytm blendingu wielomianowego n -tego rzędu. Zgodnie z przyjętą w pracy konwencją autor przechodzi od ogółu do szczegółu, czyli najpierw opisuje ogólnie poszczególne kroki w algorytmie, a potem je uszczegóławia. Na zakończenie rozdziału przedstawione są eksperymenty prowadzące do wyboru przez doktoranta rzędu wielomianu interpolacyjnego.

W rozdziale 8 doktorant opisuje proces optymalizacji i metodyczne podejście do optymalizacji wielokryterialnej. Jako podstawowy przyjmuje koszt ekonomiczny stanowiący kombinację liniową czasu cyklu i energii cyklu. W tym przypadku optymalizacji podlega punkt zatrzymania podstawy mobilnej, na której jest zamocowany manipulator. W celu określenia trajektorii, po której robot będzie się poruszał, wykorzystuje wcześniej omówiony algorytm blendingu wielomianowego.

W rozdziale 9 opisane są badania doświadczalne z wykorzystaniem robota ES5 i platformy mobilnej AMR – obydwu produkcji firmy EasyRobots. Dla 8 zadań typu podnieś – odłóż zwalidowano model określania zużycia energii oraz dla dwóch przykładowych zadań przeprowadzono analizę zależności zużycia energii od miejsca posadowienia.

Rozdział 10 zawiera dyskusję wyników, 11 – opisuje wkład rozprawy w dziedzinę robotyki a 12 zawiera podsumowanie.

Dodatkowo w załączniku C zawarty jest opis wdrożenia wyników badań do praktyki przemysłowej a w załączniku D opinie z firm Sorter i Stalko dotyczące korzyści z wdrożenia do ich praktyki przemysłowej opisanych wyników badań naukowych.

Struktura pracy jest typowa dla tego rodzaju opracowań i bardzo czytelna. Rozprawa zawiera wszystkie istotne elementy warsztatu naukowca: analizę literatury, postawienie celów, analizę teoretyczną, walidację metodologii, badania doświadczalne i wdrożenie do praktyki przemysłowej. Pod tym kątem oceniam pracę bardzo wysoko.

2. Ocena zastosowanego piśmiennictwa

Autor przeprowadził analizę piśmiennictwa dotyczącą zakresu pracy, zarówno w aspekcie generowania trajektorii robota wokół punktów bazowych jak i minimalizacji zużycia energii. Jako jedyną uwagę dyskusyjną w tym zakresie można wskazać brak przytoczenia algorytmów (równań) blendingu stosowanych w typowych robotach przemysłowych. Pozwoliłoby to lepiej porównać rozwiązanie autora do bieżącego stanu techniki.



3. Ocena celu i tezy pracy

W czwartym rozdziale autor sformułował zakres, cel i tezę pracy. Zakres pracy, obejmujący kompleksowe opracowanie oprogramowania robotów realizujących zadania klasy podnieś – odłóż uwzględniające wszystkie aspekty ekonomiczne (zarówno skrócenie czasu realizacji zadania jak i zmniejszenie zużycia energii), uważam za istotny z punktu widzenia praktycznego jak i wnoszący wkład w rozwój dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Kluczowym dla innowacyjności rozprawy jest połączenie wielu znanych z literatury rozwiązań zadań cząstkowych w jedną spójną całość, możliwą do wykorzystania w oprogramowaniu robotów przemysłowych i poprawiającą ich osiągi.

Jako tezę pracy autor podał: *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*. Sformułowanie tezy pracy uważam za nie do końca trafne, zwłaszcza, że nie obejmuje wszystkich osiągnięć autora, a z drugiej strony zawiera określenie „dynamiczna zmiana lokalizacji robota”, które jest nie do końca doprecyzowane – również w dalszej treści pracy - a co za tym trudne do udowodnienia.

Cel pracy jest bardzo mocno nastawiony na wdrożenie: *Celem użytkarnym pracy jest wdrożenie proponowanego podejścia do serii robotów przegubowych opracowanych i produkowanych w polskich innowacyjnych firmach technologicznych Sorter Sp. J. i EasyRobots Sp. z o.o.* Koreluje to bardzo dobrze z faktem, że jest to doktorat wdrożeniowy. Uważam tak postawiony cel za właściwy i ważny z naukowego i przemysłowego punktu widzenia. Jego osiągnięcie stanowi o wypełnieniu sformułowania art. 187 pkt 2 prawa o szkolnictwie wyższym i nauce: „Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej”.

3. Ocena metod badawczych i wyników badań

W rozprawie doktorskiej doktorant zastosował bardzo szeroki wachlarz narzędzi badawczych: metody analityczne (rozwiązanie zadania prostego i odwrotnego kinematyki i odwrotnego dynamiki), numeryczne metody optymalizacyjne (algorytm optymalizacji rojem cząstek), badania doświadczalne (określenie zużycia energii). Wszystkie te metody są połączone w jeden spójny ciąg prowadzący do realizacji celu pracy. Uważam, że zostały one prawidłowo dobrane i użyte, pokazując bardzo gruntowną wiedzę teoretyczną autora w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne – w szczególności z robotyki. W tym zakresie jedynym punktem dyskusyjnym może być udowadnianie poprawności wybranych rozwiązań za pomocą „studium przypadku”. Dotyczy to przykładowo wyboru stopnia wielomianu w procedurze blendingu. Podejrzewam, że analityczne udowadnianie poprawności poszczególnych wyborów może nie być możliwe, ale autor mógłby pokusić się o analizę statystyczną wielu „studiów przypadku” lub przynajmniej skomentować zagrożenia płynące z opierania się tylko na jednym przypadku.

Uzyskane wyniki prac badawczych, a w szczególności opracowany algorytm planowania trajektorii robotów realizujących zadania typu podnieś – odłóż oraz algorytm wielokryterialnej optymalizacji ścieżki oceniam bardzo wysoko. Pokazują one dojrzałość naukową autora oraz jego umiejętność wykorzystania wyników prac naukowych w praktyce.

Potwierdzeniem jakości prowadzonych przez doktoranta badań naukowych jest opublikowanie ich wyników w recenzowanym czasopiśmie naukowym: Gruszka, Ł. i Bartyś, M.,



„A New Energy-Efficient Approach to Planning Pick-and-Place Operations”, *Energies*, t. 15, nr. 23, 2022, ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en15238795 oraz na konferencji naukowej.

Uważam, że tematyka pracy jest istotna z punktu widzenia dyscypliny Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, cel pracy został osiągnięty a teza pracy udowodniona.

Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że doktorat jest realizowany jako doktorat wdrożeniowy a przeprowadzone badania i opracowane algorytmy są wykorzystywane w rzeczywistych robotach pracujących na rzeczywistych stanowiskach przemysłowych i przynoszą tam wymierne korzyści ekonomiczne.

Do najistotniejszych osiągnięć pracy zaliczam:

1. Opracowanie algorytmu blendingu wielomianowego dostosowanego do planowania trajektorii definiowanego zarówno w przestrzeni zadaniowej jak i przegubowej,
2. Opracowanie i zwalidowanie metody szacowania zużycia energii przez robota przemysłowego w trakcie realizacji zadań typu podnieś – odłóż,
3. Opracowanie metody określania optymalnego wg zadanych kryteriów miejsca posadowienia robota (lub jego zatrzymania w przypadku robotów na podstawie mobilnej) do realizacji zadania typu podnieś – odłóż,
4. Wdrożenie wyżej wspomnianych osiągnięć do praktyki przemysłowej.

4. Ocena edycyjnej i formalnej strony rozprawy

Rozprawa została napisana poprawnie pod kątem edycyjnym i formalnym. Na szczególne uznanie zasługuje bardzo klarowny sposób przedstawiania opracowywanych algorytmów i modeli analitycznych. Jedynym zauważonym przeze mnie mankamentem w tym zakresie jest używanie tego samego symbolu do określania różnych zmiennych. Przykładowo symbol n ma aż 3 znaczenia: przełożenie przekładni, liczba osi napędowych robota i stopień wielomianu interpolacyjnego.

5. Uwagi krytyczne i kwestie dyskusyjne

W trakcie lektury pracy zauważono bardzo niewielką liczbę uchybień formalnych czy kwestii dyskusyjnych, przedstawionych poniżej. Nie mają one jednak wpływu na pozytywną ocenę pracy.

- Str. 39 „wyznaczenie dynamicznych sił i momentów” – słowo dynamicznych jest w tym przypadku całkowicie zbędne.
- Str. 41, równanie (6.1) – równanie to oraz wcześniej zdefiniowane parametry D-H wydają się być odmienne od klasycznego podejścia jeśli chodzi o indeksowanie.
- Str. 46 równanie (6.13) – proszę o weryfikację i uzasadnienie znaków
- Str. 49 równanie (6.19) – to równanie jest poprawne jedynie dla przenoszenia napędu z silnika do przegubu. Dla przypadku hamowania silnikiem, który w robotyce występuje bardzo często, równanie to przyjmuje inną postać, również zastosowania w (6.20) i w tabeli 6.4 funkcja aproksymująca i współczynniki wielomianów nie będą prawdziwe dla tego przypadku, gdyż cytowane dane producenta dotyczą jedynie przenoszenia napędu z wału wejściowego na wał wyjściowy.
- Str. 54 równanie (6.30) – oznaczenia c_{234} , s_{234} , s_{23} , c_{23} nie są zdefiniowane, podobnie w kolejnych równaniach brakuje zdefiniowania niektórych oznaczeń.
- Str. 56 równanie (6.37) – Czy argument funkcji x to moment obciążenia? Oznaczenia współczynników wielomianu pokrywają się z parametrami D-H. Ponadto doktorant



- nie zdefiniował jak realizuje interpolację / ekstrapolację dla prędkości obrotowych różnych od wymienionych w tabeli 6.4
- Str. 59 „Algorytm blendingu wielomianowego” – autor w całej pracy (ja za nim w recenzji również) używa słowa angielskiego „blending” podczas gdy wg Słownika Języka Polskiego istnieje jego polski odpowiednik „miksowanie” lub spolszczony z angielskiego – blendowanie. Czy jest tu konieczne stosowanie słowa angielskiego?
- Str. 64 – doktorant napisał: „Promień blendingu określa maksymalne dopuszczalne i deklarowane odchylenie odległości euklidesowej generowanej ścieżki względem punktu węzłowego”. Ta definicja nie do końca zgadza się z późniejszym wykorzystaniem tego parametru. Dodatkowo proszę o wyjaśnienie, czy ta odległość euklidesowa dotyczy jedynie wymiarów liniowych. Co z przypadkiem, gdy w analizowanym segmencie ścieżki wiodącym jest zmiana orientacji? Przy tej okazji należałoby jeszcze zapytać, w jaki sposób doktorant sprawdził, że fragment trajektorii po interpolacji wielomianowej faktycznie mieści się w sferze blendingu i nie występuje sytuacja, że na skutek wygładzania drugiej i trzeciej pochodnej położenia punkt TCP przejedzie znacznie dalej niż opisuje to promień blendingu. Brak również odniesienia w opisywanym algorytmie do tego, czy tak sparametryzowana trajektoria będzie prowadziła punkt TCP po tej samej ścieżce dla dużych (przy realizacji ruchu) i małych (przy programowaniu robota) prędkości.
- Str. 66 rys. 7.4 Strefa blendingu nałożona na segment ścieżki z interpolacją liniową w przestrzeni zadania powoduje, że ścieżka przestaje być liniowa. Jak duże są te odchylenia i czy są dopuszczalne?
- Str. 68 równanie (7.1) - współczynniki wielomianu $b_0 \dots b_l$ powinny być oznaczone $b_0 \dots b_n$.
- Str. 72-76, rysunki 7.6 – 7.10. Brak opisu który przebieg dotyczy którego przegubu robota. Ponadto w podpisach do rysunków mowa jest o przemieszczeniach, prędkościach i przyspieszeniach i zrywach członów robota – prawdopodobnie chodziło o przeguby.
- Str. 77 wiersz 67 od dołu – doktorant napisał: „Celowym wydaje się więc wybór wielomianu 3-go rzędu do interpolacji trajektorii wstępnej.” Jest to pierwsze miejsce, gdzie pojawia się kwestia interpolacji trajektorii wstępnej wielomianem. Pojawienie się tego wniosku bez wcześniejszego opisu problemu jest mocno zaskakujące dla czytelnika.
- Str. 77 Wniosek „Z analizy wyników i przeprowadzonych badań eksperymentalnych rozwiązaniem właściwym wydaje się być zastosowanie blendingu wielomianem stopnia piątego.”, choć prawdopodobnie poprawny, jest dość słabo uzasadniony merytorycznie – wynika z analizy tylko jednego przykładu i nie jest oparty o konkretne kryteria.
- Str. 91. Tabela 9.2 – Czy całkowity koszt stanowiska obejmuje tylko robota? W przypadku, gdy to stanowisko jest elementem linii technologicznej, czas cyklu najwolniejszego z urządzeń wpływa na czas cyklu całej linii.
- Str. 92, rys. 9.4 czy względny błąd modelu oznacza błąd estymaty mocy w danej osi w stosunku do mocy całego robota? Jeśli tak to ta nazwa jest myląca.
- Str. 94, tabela 9.4 – kolumna „Różnica [%]” – wartości w kolumnie są bez znaku, co jest mylące.
- Str. 103 – ostatni wniosek jest inny niż zamieszczony na str. 77 – skąd ta różnica?



6. Podsumowanie

Podsumowując powyższą recenzję, z uwagi na fakt, że:

1. rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, jakim jest opracowanie algorytmu blendingu wielomianowego dostosowanego do planowania trajektorii definiowanego zarówno w przestrzeni zadaniowej jak i przegubowej i opracowanie metody określania optymalnego wg zadanych kryteriów miejsca posadowienia robota do realizacji zadania typu podnieś – odtóż,
2. rozprawa zawiera opis zastosowania uzyskanych wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej,
3. postawiona teza pracy została udowodniona w stopniu wystarczającym i maksymalnym dla takiego, jak w pracy, jej sformułowania, a cel pracy został zrealizowany,
4. doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej,

stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wymagania ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce – stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuje do Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Leszek Podsędkowski