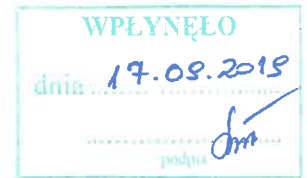




AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział EAIiB

Katedra Automatyki i Robotyki



Kraków, dn. 9.09.2019r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej
magistra inżyniera Wojciecha Zwonarza
z tytułowanej**

Algorytmy wysokiej dokładności śledzenia trajektorii robota przemysłowego.

Niniejsza recenzja została przygotowana na zlecenie Prof. dr. hab. inż. Ryszarda Sroki, Dziekana Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie - pismo nr L/Dz/ WEAIIB-b/510-19-3/13 z dnia 5.lipca.2019r. Zlecenie dotyczy oceny spełniania przez rozprawę doktorską mgr. inż. Wojciecha Zwonarza: Algorytmy wysokiej dokładności śledzenia trajektorii robota przemysłowego warunków określonych w art. 13, ust 1, ustawy o stopniach i tytule naukowym w dyscyplinie automatyka i robotyka.

1. Zagadnienia naukowe i naukowo-techniczne rozprawy

Tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej dotyczy problemów sterowania robotami przemysłowymi z uwzględnieniem modelu dynamicznego oraz rozwiązanie problemu omijania przeszkód w czasie rzeczywistym. W rozprawie rozpatrywane są zagadnienia istotne z punktu widzenia praktycznych zastosowań metod sterowania w robotyce, w szczególności przemysłowej. Motywacją do realizacji przedmiotowej pracy doktorskiej było zapotrzebowanie na opracowanie i zbadanie algorytmów planowania trajektorii i pozycjonowania na niej końcówki roboczej manipulatora.

Cztery tezy zostały sformułowane na stronie 6 w następujący sposób:

T1: Dzięki znajomości modelu matematycznego robota przemysłowego, możliwym jest zaprojektowanie regulatora przewidującego zachowanie końcówki manipulacyjnej robota i obliczanie sterowania, które pozwala zwiększyć precyzję ruchu.

T2: Do przewidywania dynamiki ramienia robotycznego można używać całkowań numerycznych, które pozwalają na obliczanie sterowania w czasie rzeczywistym.

T3: Horyzont predykcji dynamiki ruchu jest zależny od planowanego typu oraz przebiegu trajektorii manipulatora robotycznego.

T4: Planowanie trajektorii w sposób parametryczny pozwala uprościć algorytmy sterowania predykcyjnego.

Dr hab. inż. Adam Krzysztof Piłat, prof. nadzw. AGH

**Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Katedra Automatyki i Robotyki**

Kierownik laboratoriów: robotyki, fotowoltaiki i lewitacji magnetycznej
Al. A. Mickiewicza 30 C3-6, 30-059 Kraków,
tel. +48 12 61734844, fax +48 12 6341568
e-mail: ap@agh.edu.pl, home.agh.edu.pl/~ap



Realizacja tych celów wymagała opracowania modelu matematycznego robota, jego weryfikację na podstawie przeprowadzonych badań identyfikacyjnych, opracowania algorytmów sterowania, przeprowadzenia badań eksperymentalnych w czasie rzeczywistym i analizy uzyskanych rezultatów. Taki cykl pracy badawczej daje się zaobserwować w przedstawionej rozprawie. Tym samym stanowi on kompletny proces badawczy, wartościowy pod względem naukowym i praktycznym ze względu na potencjalne możliwości zastosowania zbadanych metod w praktyce przemysłowej.

2. Organizacja i redakcja rozprawy, odniesienia do literatury

Rozprawa obejmuje 103 strony maszynopisu, 83 pozycji literatury (s. 85÷89), w tym 2 pozycje współautorskich doktoranta z Promotorem zawartych w spisie literatury oraz 3 pozycje samodzielne. Rozprawa została podzielona na 11 rozdziałów (wliczając wstęp, podsumowanie, wnioski, spis rysunków), bibliografię oraz cztery dodatki (str. 90÷ 103). Pozycje bibliograficzne pokrywają zakres tematyczny rozprawy.

Na wstępie z przykrością muszę stwierdzić iż praca została zredagowana mało starannie o czym wspominam w pkt. 4 niniejszej recenzji. Struktura pracy jest prawidłowa, a czytelnik jest prowadzony przez kolejno poruszane zagadnienia. Jednakże, analizę treści utrudniają: rozbieżność formatowania symboli w równaniach i tekście, wprowadzane anglicyzmy, oraz zróżnicowana czytelność wykresów w tym z pominięciem opisów osi i legend.

3. Osiągnięcia naukowe i uwagi pozytywne

Rozprawa przedstawia zagadnienia dotyczące trzech typów robotów przemysłowych, które stanowią wyposażenie Katedry Automatyki i Robotyki. Pierwszy robot wykorzystujący silniki wysokomomentowe i silnik liniowy stanowi oryginalne stanowisko badawcze. Dwa kolejne to typowe konstrukcje, które można spotkać w przemyśle. W dodatku A autor przedstawia kinematykę wszystkich trzech robotów, odpowiednio: ramię Stanfordzkie, IRP-6, Mitsubishi RV-2F-D. Tamże, zamieszcza wybrane parametry dla robota Mitsubishi RV-2F-D w tym wyznaczone na podstawie modelu CAD/CAE. Szczególną uwagę zwraca dokonane z powodzeniem działania inżynierskie (ang. reverse engineering) polegające na detekcji parametrów transmisji odczytów z enkoderów robota Mitsubishi RV-2F-D, co pozwoliło autorowi realizować stawiane w pracy cele, w tym identyfikację dynamiki robota i jej reprezentację w postaci modeli ARMAX i sieci neuronowej.

Za główne osiągnięcia naukowe uznaję:

- Zaproponowanie i zrealizowanie trajektorii robota za pomocą aproksymacji wielomianowych, aproksymacji funkcjami sklejanymi, w tym z wykorzystaniem krzywych Bezier'a. Zastosowanie powyższych aproksymacji do realizacji przykładowych trajektorii: prostoliniowej, helisy i elipsy wraz z analizą błędów aproksymacji.

- Przeprowadzenie identyfikacji parametrycznej i modelowania dynamiki robotów za pomocą metody ARMAX oraz próba modelowania za pomocą sieci neuronowej.
- Opracowanie różnych wariantów sterowania (LQ, PID) w tym regulatora typu PD+ wraz z analizą stabilności z wykorzystaniem twierdzenia Lapunova i La Salla.
- Opracowanie regulatora adaptacyjnego realizującego adaptację parametrów modelu, w tym z obserwacją macierzy bezwładności i eliminacją pomiaru lub estymacji drugiej pochodnej zmiennych przegubowych robota.
- Opracowanie regulatora hybrydowego typu PD wraz z siecią neuronową, pełniącą rolę aproksymatora dynamicznego parametrów tarcia, mas i momentów bezwładności.
- Opracowanie nieliniowego regulatora predykcyjnego z całkowaniem numerycznym i optymalizacją wskaźnika jakości przy jednoczesnym uwzględnieniu zadania nadążania, w tym z uwzględnieniem omijania przeszkody (ruchomej i nieruchomej) poprzez realizację modyfikacji zadania optymalizacji z zastosowaniem metody funkcji kary. Realizację zadania sterowania omijania przeszkody w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem robota Mitsubishi RV-2F-D.
- Zastosowanie systemu wizyjnego wraz ze stosowną algorytmiką do detekcji robota oraz obiektu na zrobotyzowanym stanowisku badawczym.

Należy podkreślić znajomość i świadomość autora w zakresie sterowania w czasie rzeczywistym, w tym z rozszerzeniem o analizy czasowe punktualności wykonania zadań sterowania czy też przetwarzania obrazów.

Praca ma zastosowanie praktyczne poprzez możliwe wdrożenie opracowanych metod sterowania dla robota Mitsubishi RV-2F-D.

4. Wątpliwości i uwagi krytyczne

Temat rozprawy skupia uwagę czytelnika na jednym robocie przemysłowym. Tymczasem autor poświęca uwagę aż trzem robotom, ostatecznie realizując badania eksperymentalne z wykorzystaniem robota Mitsubishi. W mojej ocenie wystarczającym było skupienie się na tym ostatnim, dopracowanie jego modelu oraz przeprowadzenie wielu badań symulacyjnych i eksperymentalnych pozwalających dobitnie potwierdzić tezy pracy.

W tezie pierwszej autor podkreśla, iż znajomość dynamiki manipulatora jest konieczna do zastosowania w projektowaniu i stosowaniu z algorytmem sterowania.

Przeprowadzona identyfikacja (rozd. 5) dotycząca wyłącznie robota RV-2F wykazała, że model ARMAX umożliwia reprezentację dynamiki robota, zaś sieć neuronowa niekonieczna.

Odnosząc się do drugiej tezy konieczne jest uzupełnienie stwierdzenia ze str. 59 dotyczącego powiązania metody całkowania numerycznego z nieliniową dynamiką obiektu. Czy modelowanie winno być realizowane o modele ciągłe czy dyskretne? Konieczne jest również doprecyzowanie zależności jakości sterowania w zależności od horyzontu predykcji i dynamiki trajektorii (str. 61). Teza czwarta wymaga uzupełnienia o wyniki realizacji sterowania

predykcyjnego dla trzech typów trajektorii (prostej, linii śrubowej, elips, o których autor wspomina na str. 7 i w rozdziale 3. Podczas lektury rozprawy nasunęły się następujące pytania:

- Jakie eksperymenty należy przeprowadzić aby uzyskać reprezentatywne ciągi uczące?
- Jak dobrać optymalną strukturę sieci neuronowej, aby poprawnie reprezentowała dynamikę robota?
- Do jakiego stopnia dopuszczalne są uproszczenia, zwłaszcza serwomechanizmów, w tym ich własności sprężysto-tłumiących, aby uzyskać pożądaną jakość regulacji?
- Jak niedokładność modelowania wpływa na syntezę proponowanych metod sterowania i ostatecznie jakość regulacji?
- Jaka jest wrażliwość sterowania predykcyjnego na błędy modelowania?

Po analizie treści rozprawy stwierdzam, iż kilka aspektów różnej wagi wymaga dopowiedzenia/doprecyzowania. Zawarłem je poniżej w formie pytań w porządku chronologicznym:

- s.7 Jakie są praktyczne zastosowania podanych trzech typów trajektorii: ruch wzdłuż prostej, linii śrubowej, wokół elipsy.
- s. 16 Czy tak opisana energia reprezentuje całkowitą energię występującą w układzie?
- s. 17 Czy taki model tarcia jest wystarczający i reprezentatywny, co oznaczają symbole x , u , t na s. 17?
- s. 19 dyskusyjna dynamika elementów wykonawczych – kiedy można pominąć indukcyjność uzwojeń silnika, czy serwomechanizmy wprowadzają dynamikę w człony przegubów? Jaka jest sprężystość przekładni? Co można powiedzieć o parametrach dynamicznych całego zespołu napędowego?
- s. 22 Nie określono dziedziny dla zmiennych a i t .
- s. 26 Nie określono dziedziny dla m , n , t definiując wielomiany Bezierra.
- s. 29-30 przedstawiono skromny komentarz do wyników badań aproksymacji oraz przedstawionych wykresów.
- s. 37-39 opis sieci neuronowych - zbyt ubogi, uproszczony zwłaszcza w kierunku sieci reprezentujących dynamikę co można powiedzieć o sieciach ze sprzężeniem zwrotnym, np. Elmana.
- s. 40 Brak dziedziny dla zmiennej " z ".
- s. 42 transmitancja s - brak dziedziny.
- s.42 Ile eksperymentów identyfikacyjnych przeprowadzono? Proszę podać analizy statystyczne danych eksperymentalnych. Jaka jest wiarygodność otrzymanych modeli? Jak jakość modelowania wpływa na jakość sterowania?
- s. 45 brak literatury dot. twierdzeń.

- s.45, rys. 5.6 jakie są przyczyny uzyskania błędów modelowania za pomocą sieci neuronowej.
- s. 47 Autor zaznacza dwa sposoby sterowania: „każdym członem osobni oraz wszystkimi jednocześnie”. Proszę rozwinąć to stwierdzenie w kontekście jakości regulacji proponowanych przez Pana regulatorów.
- s. 48 (6.2) Czy idealny regulator PD (6.2) oraz idealny regulator PID (6.4) są praktycznie realizowalne? Jaki jest wpływ parametrów regulatora na dynamikę robota?
- s. 51 (po 6.18 - 6.20) "dodatnio określone" - to jest ściśle powiązane z D i Kp w (6.19) Jakie są założenia co do D i Kp?
- s. 53 Czy stwierdzenie tylko ogólna znajomość dynamiki by zapewnić stabilność sterowania" jest słuszne, proszę uzasadnić.
- s. 56 Czy model zaproponowany model tarcia jest wystarczający? Czy zastąpienie zjawiska tarcia przez sieć neuronową jako element aproksymujący jest słuszne? Jak są reprezentowane komponenty Stribeck, Coulomba i wiskotyczne?
- s. 58 Jak będzie działać NMPC w przypadku bazowania na modelu obciążonym znacznym błędem?
- s. 60 Wnioski dot. metod numerycznych.
- s. 61 Dlaczego „...wydłużenie horyzontu predykcji skutkowało wysokim błędem ustalonym ...”?
- s. 64-68 Szkoda, że rysunki w jednym z najważniejszych rozdziałów nie posiadają opisów osi, ani legend.
- s. 80 Jakie są czasy wykonywania poszczególnych faz algorytmu?
- s. 98 – przebiegi prędkości – czy prędkość ilustrujące ruch określonej osi może przybierać taki kształt, przy tak zilustrowanej zmianie położenia?

5. Wybrane uwagi edycyjne

Należy podkreślić fakt, iż praca została mało starannie zredagowana. Sadzę, że wybór edytora tekstów – typu Microsoft Word lub innego zamiast edytora Latexa spowodował przy tak licznych równaniach wiele trudności edycyjnych i tym samym utrudnia czytelność. Poniżej wymieniam wybrane uchybienia edycyjne i stylistyczne (nie wymienione zostały zarchiwizowane w moim egzemplarzu rozprawy):

Edycyjne:

- s. 9 i_cylindrycznym
- .[51]
- s. 14 równanie -> równania
- s. 19 (2.12) R_a i w tekście
- s. 19 (2.13) b_s , k_s , jeśli małymi to indeks i , a jeśli wielkimi to macierze tłumień i sprężystości.

- s. 21 czcionka
- s. 22 drodze, spliny
- s. 23 jest "ze", winno być "że",
- s. 23 jest „uprasza „ , a winno być „upraszcza”,
- s.29 wykresy nieczytelne, brak legendy
- s. 30, 31, 33, 34, 35 wykresy - legenda - brak ?? , elipsa, komentarz
- s. 36 interpunkcja
- s.40 sposób opisu rysunków wieloelementowych, zamiast oznaczeń (np.: a, b, c, d) opisuje położenie w rogach
- s. 40 jest "szare pydełko", winno być "pudełko"
- s. 43, s 44
- brak jednostek na wykresach, gdzie indziej brak opisu osi, zbyt mała czcionka, słabo czytelne opisy osi
- s. 45 anglicyzm - framework
- s. 46 brak opisu osi
- s.58, rys. 7.1.
- Obiekt oznaczono jako O z daszkiem, nie opisano czym jest teraz y i y'(t), można się oczywiście domyślić z dalszych rozumowań
- s.59, rys 59 Nieczytelny, brak opisu osi
- zły odsyłacz do rysunku z robotem stanfordzkim
- rys. 73 brak jednostek, legendy
- s.63 symbol "n" - winien być napisany kursywą

Stylistyczne

- s. 3 Eksperymenty na robocie rzeczywistym
- s. 22 „spliny typu B”
- s. 27 „algorytmy poszukujące punkty kontrolne krzywej” STYL, ELIPSA
- s. 28 czyli rosnący
- s.28 splinu
- s. 59 "wystartowania modelu"
- s. 61 "zaplanowana ścieżka oraz przewidywana droga"
- s.62 omijania -> omijanie

Pomimo dobrego poziomu merytorycznego uważam, iż praca doktorska winna się cechować starannością edycyjną oraz czystością mowy polskiej.

6. Przydatność rozprawy dla nauk technicznych

Przedstawiona do recenzji rozprawa zdaniem recenzenta stanowi ważne i wartościowe osiągnięcie w rozwoju nauk technicznych w tym w szczególności ukierunkowanych na aplikacje przemysłowe. Zbadanie metod aproksymacji trajektorii pozwala na upraszczanie planowanych ruchów manipulatora. Opracowanie algorytmu sterowania wykorzystującego nieliniowy algorytm predykcyjny z funkcją kary zastosowaną do omijania przeszkód ruchomych i nieruchomych ma znaczenie nie tylko naukowe ale i praktyczne – możliwe do wdrożenia w praktyce przemysłowej.

7. Wniosek końcowy

Zdaniem recenzenta, rozprawa doktorska mgra inż. Wojciecha Zwonarza spełnia w stopniu dopuszczającym wymagania stawiane w „Ustawie o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14 marca 2004r. (Dz. U. Nr 65, poz. 595) pracom na stopień doktora nauk technicznych.

Wnoszę o dopuszczenie przedmiotowej rozprawy doktorskiej do publicznej obrony pracy doktorskiej w dyscyplinie Automatyka i Robotyka.

Recenzent

Dr hab. inż. Adam Krzysztof Piłat, prof. n. AGH