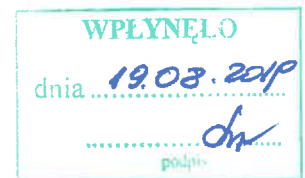


Poznań, dnia 5.08.2019 r.

Krzysztof Kozłowski
Politechnika Poznańska
Instytut Automatyki i Robotyki



**Opinia na temat rozprawy doktorskiej
mgr inż. Wojciecha Zwonarza
pt. „Algorytmy wysokiej dokładności śledzenia trajektorii robota przemysłowego”.**

Opiniowana rozprawa doktorska dotyczy algorytmów śledzenia trajektorii dla klasy robotów przemysłowych używanych w różnych gałęziach przemysłu. Robotami użytymi do egzemplifikacji uzyskanych algorytmów sterowania są ramie Stanfordzkie, robot przemysłowy IRp-6 oraz robot przemysłowy Mitsubishi RV-2F. Autor rozprawy sprecyzował następujące cztery tezy: Teza 1: Dzięki znajomości modelu matematycznego robota przemysłowego, możliwe jest zaprojektowanie regulatora przewidującego zachowanie końcówki manipulacyjnej robota i obliczenie sterowania, które pozwoli zwiększyć precyzję ruchu. Teza 2: Do przewidzenia dynamiki ramienia robotycznego można używać całkowań numerycznych, które pozwalają na obliczenie sterowania w czasie rzeczywistym. Teza 3: Horyzont predykcji dynamiki ruchu jest zależny od planowanego typu oraz przebiegu trajektorii manipulatora robotycznego. Teza 4: Planowanie trajektorii w sposób parametryczny pozwala uprościć algorytmy sterowania predykcyjnego. Recenzent rozprawy nie ma żadnych wątpliwości, że tematyka rozprawy mieści się w dyscyplinie naukowej automatyka i robotyka w szczególności dotyczy sterowania i planowania trajektorii dla robotów przemysłowych. Zasadnicza trudność polega jednak na tym, że problem sterowania i planowania trajektorii jest przedmiotem licznych publikacji, rozpraw doktorskich, habilitacyjnych jak również opracowań zwartych w postaci książek. Uzyskanie wartości dodanej inkrementalnej jest zatem bardzo trudne, tym niemniej Autor rozprawy podjął się tego wyzwania. Trudno jest mi dopatrzeć się w rozprawie nowych wyników teoretycznych. Tę sprawę będę dyskutował w dalszej części opinii. Z pewnością rozprawa zawiera wiele cennych wyników eksperymentalnych i jej Autor ma bardzo bogate doświadczenie w tym zakresie i jest to z pewnością zasadniczy walor tej pracy. Część teoretyczna budzi pewien niedosyt i będę tutaj oczekiwał odpowiedzi na pytania zawarte w opinii.

Przejdę teraz do omówienia pewnych uwag o charakterze ogólnym.

1. Rozprawa liczy 103 strony, jest dobrze napisana w języku polskim i dosyć poprawnie zredagowana. W przypadku gdy zdanie kończy się wzorem Autor nie stawia kropki. Tak redaguje się wiele dokumentów w literaturze anglojęzycznej. W piśmiennictwie polskim stawia się znak końca zdania w postaci kropki. Autor ma świadomość, że literatura przedmiotu jest bardzo obszerna i zdecydował się na cytowania 83 prac w tym jest kilka opracowań autorskich. Są trzy opracowania samodzielne oraz dwa współautorskie z Promotorem rozprawy. Wszystkie są anglojęzyczne. Fakt opublikowania pięciu prac związanych ściśle z nurtem rozprawy oceniam pozytywnie. Stanowią one wsparcie dla opiniowanego dokumentu. Chciałbym też zwrócić uwagę na fakt, iż wiele prac (zazaczyłem je w spisie literatury) nie są cytowane w tekście. Poza tym nie wszystkie prace umieszczone w spisie literatury zawierają pełne dane bibliograficzne, brakuje na przykład numerów stron, wydawnictwa czy też nazwy czasopisma w którym praca została opublikowana, jako przykład wskażę publikacje o numerach [34], [38] i [39]. Ponadto

proponuje uzupełnić literaturę o kilka ważnych pozycji (oczywiście można ich wskazać bardzo wiele z uwagi na dobrze ugruntowany temat rozprawy). Są to między innymi:

- L. Biagiotti, C. Melchiorri, Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots, Springer Verlag, 2008, podaję tę pracę z uwagi na fakt, iż Autor rozprawy obszernie dyskutuje różne sposoby generacji trajektorii a obszerne opracowanie monograficzne liczy 514 stron i stanowi pewne kompendium wiedzy na ten temat. Proszę skonfrontować swoje wyniki z wynikami zawartymi w tej monografii.
 - P. Kiciak, Podstawy modelowania krzywych i powierzchni, zastosowania w grafice komputerowej, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, 2000. Autor wspomina w rozprawie o krzywych Béziera, krzywych B-sklejanych i innych. Tak w istocie są one wykorzystane w grafice komputerowej a wymieniona pozycja ujmuje te zagadnienia w ścisłym matematycznym rygorze.
 - Jean – Jacques E. Slotine, Wieping Li, Applied Nonlinear Control, Prentice Hall 1991. Jest to klasyczna pozycja literatury dotycząca sterowania robotów, również przy niepełnej znajomości modelu w ujęciu adaptacyjnym rozpatruje metodę wyliczonych momentów jak również inne metody.
 - W nawiązaniu do poprzedniej pozycji warto cytować rozprawę doktorską J.J. Craig, Adaptive Control of Mechanical Manipulators, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1988.
 - P. Dutkiewicz, Eksperyment identyfikacji parametrów modelu matematycznego robota i jego ładunku oraz z elementami hybrydowego sterowania siłą, rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, 1995. Praca dotyczy identyfikacji parametrów robota IRp-6 na którym to Autor rozprawy przeprowadził szereg eksperymentów.
 - Carlos Canudas de Witt, Bruno Siciliano, Georges Bastin, Theory of Robot Control, Springer-Verlag, 1996. Praca ta ściśle wiąże się z tematyką opiniowanej rozprawy.
 - L. Sciavico, B. Siciliano, Modelling and Control of Robot Manipulators, Springer-Verlag, 2000. Praca ta również wiąże się ściśle z tematyką rozprawy. W mojej opinii są to propozycje literatury, które wskazują na pewien stan wiedzy w tematyce rozprawy.
2. W pracy brakuje spisu oznaczeń. Rozprawa zawiera sporą liczbę wzorów, zwykle w takich przypadkach stosuje się spis oznaczeń. Nie we wszystkich miejscach wprowadzone symbole są opisane. I tak na przykład na stronie 50 wprowadzone są symbole duże K_D oraz K_P , natomiast we wzorze poniżej w wielomianie charakterystycznym występują małe k_D i k_P . Na stronie 51 jest symbol V' , czy oznacza to pochodną cząstkową po zmiennych stanu, czy jest to pochodna po czasie? Na stronie 58 Autor używa w tekście symbolu $y'(t)$ czy jest to podobnie jak poprzednio pochodna po czasie?
3. Długości rozdziałów i ich wzajemne proporcje są prawidłowe i czytelnik nie ma problemu ze zrozumieniem przedstawionych treści.
4. Przejdę teraz do opisu uwag szczegółowych, które nasunęły mi się podczas lektury pracy. Przedstawię je tak jak pojawiają się na kolejnych stronach rozprawy. Wszędzie zaznaczyłem je w tekście rozprawy. Nie będę rozróżniał ich pod względem ważności.
- strona 11, na początku strony występują symbole f_i i $x_i (i = 1, \dots, n)$, które nie są zdefiniowane.
 - strona 12, na stronie tej jest mowa o polu wektorowym. Czy jest to pole rozumiane w sensie geometrii różniczkowej?
 - W wielu miejscach w tekście pracy występują symbole, które zwykle są powyżej linii tekstu, dlaczego tak jest? Na przykład na stronie 14, $J\varphi_i$.
 - strona 17, w równaniu różniczkowym na tej stronie występuje w postaci wyraźnej czas t . Czy w istocie takie modele Autor rozpatruje w rozprawie, tj. modele nieautonomiczne? Na tej samej stronie jest mowa o równaniu (4), gdzie ono jest?
 - strona 18, występują w tekście równania (7) oraz (10) gdzie one są?

- strona 19, we wzorze poprzedzającym wzór (2.13) przy wektorze przyspieszenia i prędkości brakuje indeksu m .
- strona 21, w tekście występują różne czcionki.
- strona 21, w tekście jest jedna literówka, nie rozumiem komentarza, że druga pochodna położenia końcówki jest funkcją ciągłą, z zapisu wynika, że istotnie jest funkcją ciągłą.
- na stronach 25 i 26 powinny być odwołania do literatury wspomnianej powyżej.
- strona 36, w tekście występuje symbol $x_0=1$ nie jest on zdefiniowany. Występuje dopiero na rys. 4.2.
- strona 41, w dwóch wzorach na tej stronie występuje symbol $X(z)$. Nie ma go na rys. 5.1 natomiast wzory te wynikają z tego rysunku.
- W jaki sposób zostały wyprowadzone wzory na str. 42, nie sprawdziłem ich poprawności.
- Na stronie 45 mowa jest o zbiorze zwartym.
- Na stronie 48 jest mowa o systemie (1), jaki jest to system? We wzorze (6.1) występuje zakłócenie oraz sygnał sterujący u_k , czy zatem $K_{m_k} v_k = u_k$? Następujące wzory (6.2) oraz (6.4) są zapisane w postaci macierzowej. W jaki sposób została obliczona transformata Leplace'a zakłóceń skoro zakłócenia zgodnie z poczynionym założeniem są funkcjami nieliniowymi? Nie ma transformaty Leplace'a dla funkcji nieliniowych. Dlaczego we wzorze (6.5) występuje w liczniku $K_D S^2 + K_P S + K_I$?
- O jaką minimalizację chodzi w równaniu (6.9)?
- strona 51, we wzorze (6.17) występują symbole K_{D_i} oraz K_{P_i} nie zostały nigdzie zdefiniowane. Ponadto na tej samej stronie są odwołania do wzorów (7) i (18) o jakie tutaj chodzi wzory? Ponadto w tym miejscu warto cytować następującą pracę Tomei P., Adaptive PD controller for robot manipulators, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991, Vol.7, no 4, str. 363-570. Można tam znaleźć wywód umieszczony w rozprawie.
- strona 53, na stronie tej są błędne odwołania a mianowicie przed wzorem (6.28) powinno być odwołanie do wzorów (6.8) oraz (6.27). Podobnie przed ostatnim wzorem na tej stronie powinno być odwołanie do wzorów (6.26) oraz (6.28). Ponadto na tej stronie jest odwołanie do nieistniejącego wzoru (19). Proszę wyjaśnić skąd się wziął wzór (6.27).
- na stronie 54 we wzorze (6.29) występuje macierz $\hat{D}^{-1}(q)$. Czy macierz ta jest odwracalna, jeśli tak, to pod jakimi warunkami? W tym podrozdziale powinno być odwołanie do książki J.J. Slotine, W. Li o której napisałem w uwagach ogólnych.
- Czy propozycja opisana na stronie 56 jest autorska? Jest bardzo interesujące pod jakim warunkiem zaproponowane algorytmy z wykorzystaniem sieci neuronowych typu PD oraz LIP są stabilne. Proszę je określić.
- strona 59, jaką rolę spełnia funkcja $f(q_i, \dot{q}_v)$ występująca w pierwszym wzorze na tej stronie?
- strona 65, nie rozumiem znaczenia symbolu $\varphi(t)$ pojawiającego się na tej stronie.
- W jaki sposób została wyznaczona macierz występująca na stronie 74?
- Jakie jest pochodzenie wzorów (8.3) na stronie 77?
- Występujące na stronie 81 odwołanie do pozycji literatury [65] jest nieprawidłowe.
- Na stronie 104 mowa jest oczywiście o pracy doktorskiej a nie pracy dyplomowej.

Analiza rozprawy doprowadziła mnie do następujących wniosków.

- A1. Rozdziały 1 oraz 2 dotyczące odpowiednio kinematyki oraz dynamiki manipulatorów mają charakter podstawowy i ich treści można z łatwością znaleźć w innej literaturze. Są one jednak konieczne aby zrozumieć następne rozdziały i wyniki Autora.
- A2. Rozdział 3 ma również charakter podstawowy, dotyczy różnych sposobów generowania trajektorii w przestrzeni wewnętrznej robota. W rozdziale tym zawarte są przykłady aproksymacji w których pokazano ich zachowanie dla robota IRP będącego na wyposażeniu Katedry Automatyki i Robotyki Wydziału Elektrotechniki, Automatyki,

Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH. Te wyniki mają charakter autorski i dotyczą błędów aproksymacji dla różnych wybranych trajektorii dyskutowanych w rozprawie.

- A3. Rozdział 4 ma charakter przeglądowy i dotyczy wstępnych uwag na temat sieci neuronowych. Opracowany został na podstawie danych literaturowych.
- A4. Rozdział 5 dotyczy zadania identyfikacji parametrów dynamicznych robota. Mowa jest tutaj o identyfikacji parametrycznej znanej z literatury przedmiotu. Wartością dodaną są tutaj wyniki dotyczące identyfikacji parametrów robota przemysłowego Mitsubishi z wykorzystaniem sieci neuronowej. Zademonstrowano wysoką dokładność odwzorowania zamierzonej trajektorii. Uzyskane wyniki w mojej opinii są bardzo interesujące.
- A5. Rozdział 6 dotyczy metod sterowania robotów. Opisano tutaj znane metody sterowania nadążnego, sterowanie z uwzględnieniem sprzężenia w przód, sterowania wielocłonowe w tym regulator linowo kwadratowy, regulatory adaptacyjne oraz regulatory neuronowe. Są to w głównej mierze rozwiązania przeprowadzane na temat studiów literaturowych w tym między innymi rozprawy doktorskiej [47]. W przypadku regulatorów neuronowych brakuje mi formalnego dowodu dotyczącego stabilności ich działania. Chciałbym aby ten punkt został przedyskutowany podczas obrony rozprawy doktorskiej.
- A6. Rozdział 7 dotyczy nieliniowych regulatorów predykcyjnych. Wstępna część pochodzi ze studiów literaturowych. Znaczna jednak jego część to interesujące wyniki doświadczalne dotyczące badania różnych metod całkowania numerycznego z wykorzystaniem różnych typów klasycznych regulatorów tak aby podążać za aproksymowaną trajektorią prostoliniową dla manipulatora typu ramie stanfordzkie. Przebadano takie metody jak metodę Dormanda – Prince’a, Runge – Kutta, Bagacki – Shampine. Są to ciekawe badania dotyczące stosowalności różnych metod sterowania robotów w czasie rzeczywistym. Przedyskutowano też zadania optymalizacji, które Autor proponuje wykonać na podstawie predykcji biorąc pod uwagę błąd średniokwadratowy w skończonym horyzoncie czasowym. Są to bardzo interesujące i użyteczne wyniki. Dla modelu badawczego manipulatora RV-2D Autor dokonał syntezy regulatora predykcyjnego opartego na funkcji kary w związku z omijaniem przeszkody statycznej jak również dynamicznej. Tutaj Autor zaproponował bardzo wartościowe wyniki eksperymentalne działające w czasie rzeczywistym. Szkoda, że Autor nie odwołał się tutaj do prac teoretycznych Prof. M. Galickiego z Uniwersytetu Zielonogórskiego. Tym niemniej podał efektywne algorytmy minimalizujące koszt sterowania przy jednoczesnym omijaniu przeszkody przy minimalnym błędzie.
- A7. Rozdział 8 to też rozdział autorski w którym przedstawiono możliwości zastosowania systemu wizyjnego dla śledzenia obiektu spoza przestrzeni roboczej robota. Położenie obiektu monitorowanego w układzie zewnętrznym przez system wizyjny zostało odtworzone w układzie kartezyjańskim związanym z manipulatorem. Autor pokazał, że jest możliwe unikanie kolizji w tym przypadku z funkcji kary pomimo nieznanego początkowego położenia przeszkody. Wyniki te można uznać za bardzo interesujące. W rozdziałach 7 i 8 została przedstawiona też analiza czasowa. Aby ją uogólnić proponuję aby Autor dokonał analizy złożoności obliczeniowej wybranego algorytmu i przedstawił ją podczas publicznej obrony.
- A8. W części końcowej rozprawy są przedstawione cztery użyteczne dodatki.

Podsumowanie:

Przedstawione uwagi dyskusyjne w mojej opinii nie umniejszają osiągnięć uzyskanych przez Autora rozprawy. Doceniam Jego wyniki eksperymentalne, których uzyskanie nie było proste. Wyrażam opinię, że mgr inż. W. Zwonarz spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia doktora przez ustawę o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz stopniach i

tytułach w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2013 roku z późniejszymi zmianami w konkluzji, wnoszę o nadanie mgr inż. W Zwonarzowi stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno - technicznych w dyscyplinie Automatyka, elektronika i elektrotechnika zgodnie z art. 5 ust. 3 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z dnia 30 sierpnia 2018 r. poz. 1668) i Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 roku w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych i dyscyplin artystycznych (Dz. U. z dnia 25 września 2018 r. poz. 1818).

Janusz J. J. J.

