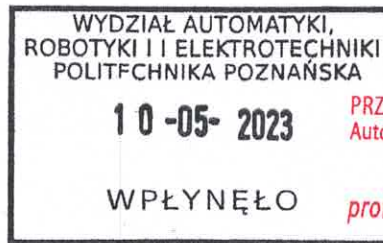


Dr hab. inż. Alicja Mazur, prof. uczelni
Katedra Cybernetyki i Robotyki
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wrocławska
e-mail: alicja.mazur@pwr.edu.pl

Wrocław, 8 maja 2023



PRZEWODNICZĄCY RADY DYSCYPLINY
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne
prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg

**Recenzja rozprawy doktorskiej pana mgr inż. Pawła Parulskiego pt.
“Linearyzacja układów niedosterowanych i badanie dynamiki zerowej
na przykładzie układów mechanicznych w R^4 i R^6 ”.**

1. Problem badawczy i jego znaczenie.

Problem badawczy przedstawiony w rozprawie dotyczy zagadnień sterowania dla układów niedosterowanych. Jako podstawowy cel sterowania autor określił stabilizację układu niedosterowanego w niestabilnym punkcie równowagi. W tym kontekście jako punkt wyjścia do zrealizowania celu posłużyły techniki pochodzące z teorii układów liniowych, np. takie jak regulatory liniowe PD, regulatory LQR, przybliżenia liniowe w sąsiedztwie punktu równowagi itp.

Takie podejście jest uprawnione i z punktu widzenia teorii sterowania układów nieliniowych poprawne, gdyż przybliżenia liniowe układów nieliniowych wyznaczane w pobliżu punktów równowagi są podstawą działania np. I metody Lapunowa. Ponadto w pobliżu punktu równowagi przybliżenie liniowe nie zmienia się (ze względu na brak dynamiki systemu) i może być traktowane w szczególnych przypadkach jako układ o zachowaniu równoważnym układowi nieliniowemu.

Z kolei problem niedosterowania powoduje, że nie cała przestrzeń stanu może być w łatwy sposób zlinearyzowana. Autor rozprawy przytacza najbardziej znane z literatury przedmiotu wyniki, przede wszystkim prace Sponga, w których jest przedstawiona teoria układów skojarzonych i nieskojarzonych będących częściowo zlinearyzowanym przekształceniem niedosterowanego układu nieliniowego. Całkowicie nowym elementem rozważań autora jest wykorzystanie tzw. quasi-prędkości do linearyzacji macierzy inercji i sprawdzenie, czy takie podejście będzie miało istotny wpływ na obszar zbieżności badanych algorytmów.

Kolejnym, pomocniczym celem sterowania, jest zadanie śledzenia trajektorii przegubowej dla niedosterowanych manipulatorów. Ponieważ manipulatory są to układy holonomiczne, to podstawowy cel sterowania jest szczególnym przypadkiem celu pomocniczego, tak więc rozwiązanie dla celu pomocniczego będzie także rozwiązaniem dla celu podstawowego. Gdyby obiekty były nieholonomiczne, to wspomniane podejście byłoby niepoprawne.

2. Wkład autora.

Wkład autora w dziedzinę sterowania układami niedosterowanymi można zauważyć w dwóch głównych obszarach. W rozważaniach teoretycznych największy wpływ mają badania nad użyciem quasi-prędkości wprowadzonych przez Rodrigueza i Jaina na zachowanie układów niedosterowanych. Autor pokazał, że quasi-prędkości pozwalają na znaczne rozszerzenie zakresu stosowalności znanych algorytmów sterowania, co jest zaskakujące i nigdy dotychczas nie było rozważane w literaturze przedmiotu. Natomiast w badaniach zarówno symulacyjnych, jak i eksperymentalnych, autor uzyskał bardzo znaczące rozszerzenie obszaru zbieżności dla warunków początkowych.

Ten drugi wątek badań jest oryginalnym pomysłem na sprawdzenie zakresu zbieżności i obszaru stosowalności pewnych wyników teoretycznych uzyskanych przez Rodrigueza, Jaina i Respondka. Zazwyczaj podczas sprawdzania poprawności działania wybranych metod i technik uzyskuje się wniosek, że np. algorytm jest globalny lub lokalny ze względu na warunki początkowe. Niestety, jak duży jest lokalny obszar zbieżności można tylko bardzo zgrubnie oszacować. Autor rozprawy postanowił sprawdzić w praktyce, dla konkretnego manipulatora i konkretnego celu sterowania, jakim jest stabilizacja chwytaka w niestabilnym punkcie równowagi, jak duże są obszary zbieżności, czy zależą one od algorytmu i nastaw regulacji, czy są spójne oraz czy na ich wielkość mają wpływ transformacje wejściowe lub transformacje przestrzeni stanu (diffeomorfizmy). Pan mgr inż. Paweł Parulski przeprowadził niezwykle obszerne, wieloaspektowe badania symulacyjne oraz eksperymentalne aby uzyskać możliwie szerokie zakresy badanych przypadków. Ilość obliczeń przeprowadzonych przez autora wynosi dziesiątki a nawet setki milionów przypadków.

Zazwyczaj w badaniach symulacyjnych wystarczy podać wartości parametrów regulacji użyte do otrzymania pojedynczych wykresów. Autor z kolei przebadał warunki początkowe w zakresie [-180 stopni, + 180 stopni] dla wszystkich 2 lub 3 obrotowych stopni swobody, zależnie od wyboru obiektu, co pozwoliło mu sprawdzić cały zakres zmienności stopni swobody. Przytoczone w rozprawie współczynniki *Area* podają procentowo obszar warunków początkowych prowadzących do poprawnej stabilizacji (do realizacji celu sterowania), co ma duży walor poglądowy.

3. Poprawność.

Wszystkie techniki i metody matematyczne, jak np. zmiana współrzędnych (czyli transformacja przestrzeni stanu wprowadzona poprzez zdefiniowanie odpowiedniego dyfeomorfizmu) lub sprzężenie zwrotne częściowe lub całkowite stosowane do różnych obiektów mechanicznych (takich jak robot Acrobot, Pendubot lub planarne wahadło) są jak najbardziej poprawnie użyte. Autor bardzo starannie dla każdego rodzaju niedosterowania wyznacza oba rodzaje układów częściowo zlinearyzowanych typu skojarzonego oraz nieskojarzonego, wyznacza ich dynamikę zerową oraz bada jej stabilność. Ponadto metoda quasi-prędkości, a więc transformacja zarówno stanu, jak i sygnałów wejściowych, jest zastosowana poprawnie, choć okazała się ona być bardzo skomplikowana w praktyce, co pokazano w licznych załącznikach zamieszczonych w pracy.

Poza aparatem matematycznym dla układów liniowych autor bardzo biegle posługuje się geometrią różniczkową oraz szeregiem metod i technik stosowanych dla układów nieliniowych, zwłaszcza metodami Lie-algebraicznymi. Uzyskane wyniki są poprawne, zgodne z literaturą przedmiotu, poparte licznymi twierdzeniami, obszernie cytowanymi w rozprawie.

Uzyskane informacje o obszarach zbieżności dla badanych obiektów i algorytmów są wprawdzie wynikiem czysto praktycznym i szczególnym, dotyczącym tylko jednego planu badań, ale pod pewnym względem jest to wynik unikatowy i wybitny. Nie spotkałam dotychczas w literaturze przedmiotu tak obszernych i tak gruntownych i wyczerpujących badań praktycznych, niosących tyle informacji, z których nie wszystkie były oczywiste i łatwe do przewidzenia, intuicyjne (np. że transformacja prędkości uogólnionych na quasi-prędkości może zwiększyć współczynnik *Area* prawie do 100 %).

4. Wiedza kandydata.

Wiedza autora rozprawy na temat zagadnień z automatyki i robotyki jest imponująca. Jest to wiedza nie tylko na poziomie praktycznym, ale także teoretycznym. Wśród zagadnień teoretycznych warto wyróżnić problem linearyzacji układu nieliniowego poprzez zmianę współrzędnych (dyfeomorfizm) i sprzężenie zwrotne oraz syntezę sterownika śledzącego trajektorie dla układu liniowego w oparciu o postać normalną Brunovsky'ego, czyli ciąg integratorów.

Wśród metod częściowej linearyzacji, autor z powodzeniem stosuje linearyzację skojarzoną oraz nieskojarzoną, a także transformację nieliniowego modelu dynamiki do postaci wyrażonej za pomocą dekompozycji Choleskiego czyli do quasi-prędkości. Obszerne i precyzyjne obliczenia teoretyczne zostały przedstawione w załącznikach od A do M. Ponadto autor poprawnie posługuje się metodami pochodzącymi z geometrii różniczkowej a stosowanymi do układów nieliniowych – np. do badania ich sterowalności, do syntezy sterowania itp.

Z kolei część praktyczna rozprawy pokazała ogromne umiejętności doktoranta w zakresie implementacji układów dynamicznych (robotów) zarówno w różnych narzędziach symulacyjnych, takich jak LabView czy Matlab, jak i na stanowiskach eksperymentalnych.

Podsumowując należy stwierdzić, że doktorant wykazał się gruntowną znajomością zagadnień i metod stosowanych w automatyce i robotyce.

5. Inne uwagi.

- Str. 20, 13 linia od góry: autor podał definicję układów niedosterowanych. Warto wspomnieć, że nie jest to jedyna możliwa definicja, ale że istnieje jeszcze inna, w której porównuje się liczbę dopuszczalnych wejść sterujących i rzeczywistych sterowań w układzie.
- Str. 27, tytuł rozdziału 2.2.1: "układy Lagranżianowe" są też nazywane "układami Lagranżowskimi".
- Str. 27, 4 linia tekstu w rozdziale 2.2.1: macierz formy kwadratowej $M(q)$ zazwyczaj jest nazywana macierzą inercji lub bezwładności, a nie "macierzą mas" jak w dysertacji, gdyż jej elementy to nie tylko masy, ale i momenty bezwładności. Nazwa znana z literatury pochodzi od tego, że macierz $M(q)$ jest macierzą formy w siłach bezwładności działających na manipulator.
- Str. 27, równanie (2.1): to równanie jest nazywane w literaturze przedmiotu równaniem Eulera-Lagrange'a II rodzaju i zazwyczaj występuje bez transpozycji przy pochodnych cząstkowych. Rozumiem jednak, że autor użył transpozycji, aby podkreślić, że wektor gradientu jest zapisywany wierszowo, a nie kolumnowo.

- Str. 27, wzór na symbole Christoffela I rodzaju: we wzorze przed ostatnim składnikiem powinien być znak “minus”.
- Str. 27, 4 linia tekstu poniżej wzoru (2.2): w elemencie $G(q)$ są zawarte nie tylko składniki grawitacyjne, jak pisze autor, ale także inne siły zachowawcze, np. idealne siły sprężystości.
- Str. 27, 7 linia tekstu poniżej wzoru (2.2): jest “ $M(q)$ jest macierzą dodatniookreśloną”, natomiast na początku rozdziału 2.2.1 użyto sformułowania “dodatnio określona macierz mas”. Poglądy polonistów są rozbieżne w kwestii nomenklatury robotycznej jednak autor powinien zachować 1 wzorec w całej pracy.
- Str. 28, rozdział 2.2.2. Nie mogę się zgodzić z konkluzją podsumowującą ten rozdział, która stwierdza, że nie jest możliwa linearyzacja przez sprzężenie zwrotne układów niedosterowanych.
Jako kontrprzykład chcę podać algorytm Johna Wena, który jest algorytmem linearyzacji statycznej dla manipulatora o elastycznych przegubach. Taki manipulator jest układem niedosterowanym, gdyż napędzane są jedynie zmienne $q_2 \in R^n$ opisujące położenie silników, zaś wymiar przestrzeni konfiguracyjnej wynosi $dim Q \rightarrow (q_1, q_2) \in R^{2n}$.
- Str. 33, rys. 2.5: oba rysunki a) i b) są identyczne... Najlepiej byłoby ten napęd, który w danej konstrukcji nie występuje, zaznaczyć np. strzałką przerywaną lub cieńszą linią.
- Str. 53, rozdział “Pomocnicze zadanie sterowania”. Skąd wziął się pomysł na poszukiwanie algorytmów śledzenia trajektorii, skoro zadanie sformułowane w rozprawie to stabilizacja robota w punkcie równowagi?
- Str. 54, równanie (4.38): dlaczego A^s jest macierzą a nie polem wektorowym? Wydaje mi się, że nawiasy Liego, iterowane lub nie, działając na dwa pola wektorowe zwracają trzecie pole wektorowe, a nie macierz. Chciałabym zobaczyć postać tego wyrażenia dla któregoś z rozpatrywanych przykładów.
- Str. 54, ostatnie zdanie na stronie: skąd pochodzi to stwierdzenie? Czy jest to jakieś twierdzenie, czy też jest to inny zapis tzw. “małej flagi systemu” Goursata?
- Str. 58, wzór (4.67): proszę o pokazanie, jak z (4.66) otrzymać (4.67).
- Str. 81, wzór (4.224) jest niepoprawny. Jest w tekście

$$\tilde{u} = H_x^{-1}\tilde{x} + H_\tau^{-1}\tilde{\tau}$$

a powinno być

$$\tilde{u} = H_x\tilde{x} + H_\tau\tilde{\tau}.$$

Wygląda na to, że jest to błąd edytorski, ponieważ reszta przekształceń (4.226)-(4.229) jest zapisana według poprawnego wzoru.

- Str. 82, wzór (4.232): taki rozkład jest nazywany dekompozycją Choleskiego.
- Str. 82, wzór (4.236): zły znak przed wyrazem zawierającym grawitację.
- Str. 94, zdanie poniżej wzoru (4.314): co wynika z niestabilności dynamiki zerowej? Jakie są tego konsekwencje dla proponowanego algorytmu sterowania?
- Str. 98, podobne zdanie o niestabilności dynamiki zerowej. Jakie są konsekwencje tego stanu rzeczy?
- W rozdziałach od 4.3 do końca rozdziału 4 autor stosuje pewien schemat rozważań dla różnych przypadków niedosterowania: najpierw wylicza postać częściowo zlinearyzowaną typu skojarzonego, następnie postać częściowo zlinearyzowaną typu nieskojarzonego, za każdym razem wylicza dynamikę zerową układu oraz bada stabilność zlinearyzowanej dynamiki zerowej.
To, czego brakuje w tej części rozprawy, to synteza – powinno się pojawić wyjaśnienie, po co to jest liczone? Czy jeśli wyjdą punkty niestabilne w przybliżeniu dynamiki zerowej, to jaki to będzie (czy w ogóle będzie) miało wpływ na dalszą część badań? Uważam, że po każdym podrozdziale w rozdziale 4 powinna się pojawić sekcja z podsumowaniem otrzymanych wyników teoretycznych oraz z wypływającymi z przeprowadzonych rozważań wnioskami odnośnie tematyki rozprawy.
- Str. 173, rys. 6.38: brakuje wykresu dla przypadku c).

6. Podsumowanie.

Biorąc pod uwagę opinie zaprezentowane w poprzednich punktach i wymagania zdefiniowane przez odpowiednią Ustawę moja ocena rozprawy pod względem trzech podstawowych kryteriów jest następująca:

A Czy rozprawa zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego?

Zdecydowanie TAK.

B Czy po przeczytaniu rozprawy zgadzasz się, że kandydat posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie Automatyka i Robotyka?

Zdecydowanie TAK.

C Czy kandydat posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej?

Zdecydowanie TAK.

Przedstawiona praca zawiera poprawnie sformułowany problem naukowy i zawiera ona oryginalne wyniki będące rozwiązaniem tego problemu, uzyskane przy pomocy znanych narzędzi i metod matematycznych, i wnosi istotny wkład w dziedzinę automatyki i robotyki. Jakość uzyskanych rezultatów oraz metodyka badań pokazują, że autor jest przygotowany do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Uważam, że praca doktorska pana mgr inż. Pawła Parulskiego spełnia wymogi formalne stawiane pracom doktorskim przez odpowiednią Ustawę i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

8.05.2023 Wrocław

Alicja Masur