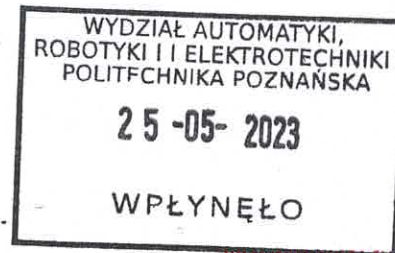


Zielona Góra. 13.05.2023

Prof. dr hab. inż. Mirosław Galicki
Instytut Inżynierii Mechanicznej
Wydział Mechaniczny
Uniwersytet Zielonogórski
ul. Licealna 9
65-417 Zielona Góra



Recenzja

PRZEWODNICZĄCY RADY DISCYPLINY
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne

prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg

rozprawy doktorskiej pt. „*Linearyzacja układów niedosterowanych i badanie dynamiki zerowej na przykładzie układów mechanicznych w R^4 i R^6* ”

autorstwa mgr inż. Pawła Parulskiego.

Opiniowana praca doktorska dotyczy bardzo aktualnego a zarazem niezwykle trudnego do rozwiązania zagadnienia naukowego jakim jest zadanie regulacji i stabilizacji niedosterowanych systemów dynamicznych opisanych silnie nieliniowymi różniczkowymi równaniami zwyczajnymi drugiego rzędu. Powyższe układy mechaniczne noszą również nazwę systemów z deficytem sterowań lub układów posiadających ograniczenia nieholonomiczne drugiego rodzaju. Dynamikę rozważanych obiektów jak i ich równań wejścia traktuje się w pracy jako w pełni znane. W rozważaniach pomija się również ograniczenia nierównościowe na sterowania oraz zmienne stanu a także nie uwzględnia się wpływu zewnętrznych sygnałów zakłócających, które mogą oddziaływać na analizowane w pracy obiekty tzn. planarne stacjonarne manipulatory o dwóch oraz trzech parach kinematycznych obrotowych V klasy. Problem regulacji systemów dynamicznych z deficytem sterowań postawiony przez Autora pracy jest zagadnieniem trudnym ponieważ liczba współrzędnych uogólnionych obiektu jest większa od liczby sygnałów sterujących i w ogólnym przypadku nie są znane obliczeniowo efektywne metody rozwiązania takiego zadania. W szczególności przedmiotem zainteresowania Autora dysertacji są dwa typy manipulatorów planarnych określane mianem Pendubot i Acrobot (w zależności od umiejscowienia napędu) o dwóch obrotowych parach kinematycznych i jednym napędzie a następnie ich uogólnienie w postaci płaskiego potrójnego wahadła o dwóch napędach umiejscowionych w parach kinematycznych. Autor pracy analizuje zadanie stabilizacji wyprostowanego manipulatora (tworzącego konfiguracje nieosobliwe) w górnym

niestabilnym punkcie równowagi położenia efektora w dwuwymiarowej przestrzeni roboczej. W literaturze przedmiotu znane są metody rozwiązania powyższego zadania w oparciu o formalizm Sponga i Blocka wykorzystujący częściową linearyzację równań dynamiki w naturalnych (fizykalnych) współrzędnych uogólnionych do „podniesienia” manipulatora. Natomiast rozwiązanie zadania balansowania manipulatora w otoczeniu pionowej konfiguracji wyprostowanej (konfiguracji osobliwej) opiera się głównie na wykorzystaniu metod linearyzacji w otoczeniu punktu równowagi a następnie zastosowaniu klasycznego manipulatora LQR. Podstawową wadą takiego podejścia jest mały obszar zbieżności warunków początkowych prezentowanych algorytmów regulacji co w praktyce mocno ogranicza ich zastosowanie w trybie on-line.

W tym kontekście Autor pracy zdecydował się na poszukiwanie rozwiązania zagadnienia stabilizacji manipulatora w punkcie równowagi wykorzystując metody linearyzacji dynamiki oparte o aparat geometrii różniczkowej. Następnie dokonał transformacji fizykalnych współrzędnych uogólnionych oraz rzeczywistych sterowań proponując w konsekwencji sterownik hybrydowy wyrażony w przetransformowanych zarówno zmiennych stanu i sygnałach sterujących, rozwiązujący kompleksowo zagadnienie stabilizacji manipulatora w punktach równowagi odpowiadających wybranym konfiguracjom osobliwym. Zaproponowana przez Autora metoda linearyzacji wykorzystująca narzędzia współczesnej geometrii różniczkowej (pochodne Liego, nawiasy Liego, dystrybucje, inwolutywność itp.) jak również zastosowanie odpowiednich przekształceń zmiennych stanu oraz sygnałów sterujących skutkuje uzyskaniem nowych algorytmów sterowania i stabilizacji, które w porównaniu ze znanymi z literatury przedmiotu wydają się być obliczeniowo efektywniejsze.

W świetle powyższego praca przedstawia rozwiązanie aktualnego problemu naukowego z dziedziny automatyki i robotyki. W mojej opinii rozprawa stanowi bardzo dobre uzupełnienie wyników istniejących w literaturze światowej. Dlatego też stwierdzam, że Autor napisał cenną (zarówno z naukowego jak i praktycznego punktu widzenia) pracę, która zasługuje na miano rozprawy doktorskiej. Stwierdzenie to opieram na następujących przesłankach.

W pracy Autor podaje kompletne rozwiązanie zagadnienie stabilizacji w punktach równowagi dla obiektów nieliniowych opisanych równaniami różniczkowymi zwyczajnymi wraz z odpowiednio zdefiniowanymi funkcjami wyjścia dla systemu dynamicznego. W sposób oryginalny Autor postawił i udowodnił tezę rozprawy o obliczeniowej skuteczności

zaproponowanych metod sterowania wykorzystując również wprowadzone przez Autora transformacje zmiennych stanu z wykorzystaniem quasi-prędkości, quasi-prędkości znormalizowanych i transformacje sygnałów sterujących. W szczególności na podstawie wielkoskalowych obliczeń numerycznych Autor wykazał, że zastosowane przez niego przekształcenia zmiennych stanu oraz sterowań powiększają obszar zbieżności zaproponowanych algorytmów sterowania i stabilizacji badanych manipulatorów planarnych. Za niezwykle cenną uważam również postawioną oraz wykazaną przez Autora dysertacji tezę o możliwości implementacji metod wykorzystujących linearyzację oraz transformację zmiennych stanu dla rzeczywistych manipulatorów planarnych. Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych Autor potwierdził zachowanie porównywalnych właściwości rzeczywistego układu ze sprzężeniem zwrotnym do tych uzyskanych na podstawie symulacji komputerowych. Za niezmiernie istotne uważam także każdorazowe numeryczne badanie stabilności dynamiki zerowej poprzez jej lokalną linearyzację. Ten istotny atrybut algorytmów regulacji obiektami niedosterowanymi w zdecydowanej większości prac z literatury światowej jest z reguły przyjmowany a priori. Niewątpliwym osiągnięciem teoretycznym Autora rozprawy jest także uogólnienie funkcji wyjścia analizowanej przez Li, Mooga i Responka, która maksymalnie linearyzuje równanie dynamiki manipulatora, na przypadek dowolnej wartości referencyjnej. Oryginalnym wkładem Autora jest również zaproponowanie procedury odpornego odwracania macierzy sterowania dla zlinearyzowanego w nowych współrzędnych układu wejście-wyjście w przypadku jej degeneracji w punktach osobliwych. Celem porównania renomowanych algorytmów sterowania znanych z literatury przedmiotu z regulatorami zaproponowanymi w pracy i wyrażonymi przez quasi-prędkości oraz quasi-prędkości znormalizowane, Autor zaproponował metodę ujednoczenia doboru wzmocnień regulatora liniowego z regulatorem bazującym na fizykalnych współrzędnych uogólnionych oraz rzeczywistym sygnałem sterującym. W tym kontekście zaproponowany sposób doboru wzmocnień uważam za szczególnie cenną „wartość dodaną” w automatyce i teorii sterowania. Za kluczowe z punktu widzenia ciężaru gatunkowego pracy wydaje się być zaproponowanie przez Autora częściowej linearyzacji manipulatora planarnego o 3 stopniach swobody z wykorzystaniem quasi-prędkości oraz uogólnienie funkcji wyjścia na liniową kombinację fizykalnych współrzędnych uogólnionych oraz quasi-prędkości. Przez umiejętny dobór quasi-prędkości \tilde{v}_3 , Autor otrzymał dynamikę obiektu z wyprostowanymi polami g_i , $i=1,2$ przy dwóch zmiennych sterujących co znacząco wpłynęło na ułatwienie syntezy algorytmów sterowania i stabilizacji manipulatora w górnej pozycji wyprostowanej.

Rozprawa liczy 251 stron, składa się z 8 rozdziałów, dobrze skorelowanej literatury przedmiotu oraz załączników. Wyodrębnić w niej można trzy części. Rozdziały 1-3 wprowadzają w zakres pracy i przedstawiają niezbędne pojęcia konieczne do zrozumienia dalszej części. Kluczowe są rozdziały 4-7, w których zaproponowano nowe algorytmy sterowania i stabilizacji w niefizykalnych współrzędnych stanu i sterowań wraz z ich implementacją. W rozdziale 4 Autor przedstawił zadanie częściowej linearyzacji manipulatorów stacjonarnych o n stopniach swobody. W szczególności skoncentrował swoją uwagę na manipulatorach planarnych o dwóch i trzech parach kinematycznych, w których zaprezentował linearyzację typu skojarzonego oraz nieskojarzonego równań dynamiki a także podał warunki sterowalności układów nieliniowych z wykorzystaniem iterowanego nawiasu Liego. Podrozdział 4.3 opisuje algorytmy regulacji ze stabilizacją wyrażone w fizykalnych współrzędnych uogólnionych oraz rzeczywistych sterowaniach oparte o formalizm Sponga. Propozycje nowych sterowników dla robotów typu Pendubot oraz Acrobot wraz z podaniem sposobu transformacji zmiennych stanu oraz wejść sterujących uwzględniającą quasi-prędkości, quasi-prędkości znormalizowane jak również postaci normalne równań dynamiki Autor przedstawił w podrozdziale 4.4. Podrozdział 4.5 prezentuje oryginalne wyniki Autora dotyczące największego wymiaru linearyzowalnego podsystemu równań dynamiki dla trójwahadła płaskiego oraz jego sterowalności. Główne teoretyczne osiągnięcia Autora zawarte są w podrozdziale 4.6, w którym proponuje częściową linearyzację dynamiki manipulatora o trzech parach kinematycznych z wykorzystaniem quasi-prędkości oraz ogólną funkcję wyjścia uwzględniającą zarówno fizykalne współrzędne uogólnione jak również quasi-prędkości. Dla otrzymanej dynamiki obiektu z wyprostowanymi polami Autor proponuje zupełnie nowe algorytmy sterowania i stabilizacji w otoczeniu punktu równowagi manipulatora. Rozdziały 5 oraz 6 zawierają wyniki obliczeń numerycznych wraz z porównaniem zaproponowanych przez Autora oraz znanych z literatury algorytmów sterowania. W rozdziale 7 przedstawiono wyniki eksperymentu dla robota typu Pendubot dla zadania stabilizacji w górnym niestabilnym punkcie równowagi. Rozdział 8 stanowi podsumowanie dysertacji.

Pragnę również nadmienić iż obliczenia numeryczne zaprezentowane w rozdziałach 5-6 stanowią niezmiernie ważny element pracy nie tylko ze względu na to, że przedstawiają ilustrację rozważań teoretycznych. W mojej opinii otrzymanie zadowalających wyników obliczeń numerycznych nie jest w omawianym przypadku sprawą prostą i jestem przekonany,

że autor spędził bardzo dużo czasu na obliczeniach zanim uzyskał sensowne wyniki. Dlatego wkład Autora w tym miejscu jest ogromny. Niesamowicie cenny jest również przeprowadzony przez Autora eksperyment na rzeczywistym obiekcie, wyniki którego są zbliżone do tych otrzymanych z symulacji komputerowych.

Poniżej zamieszczam kilka uwag krytycznych, które nasunęły mi się podczas czytania pracy.

1. Pewnym mankamentem pracy jest przyjęcie przez Autora pełnej znajomości zarówno równań dynamiki obiektu jak i funkcji wyjścia oraz założenia braku na ogół nieznanymi zewnętrznymi sygnałami zakłócającymi działającymi na obiekt sterowania. Wprawdzie we Wstępie Autor stwierdza, że ma świadomość występowania zarówno parametrycznych jak i strukturalnych niepewności modelu, to jednak nie podaje konsekwencji takiego uproszczenia. Ogólnie wiadomym jest fakt, że dynamika obiektu nie jest w zasadzie nigdy dokładnie znana. Z uwagi na to, że sterowniki Autora wykorzystują pełną wiedzę o dynamice obiektu, implementacja proponowanych algorytmów w praktyce może być problematyczna.
2. Celem powiększenia obszarów zbieżności warunków początkowych dla proponowanych algorytmów sterowania i stabilizacji Autor wykorzystuje strategię hybrydową zawierającą dwa niezależne sterowniki. Pewnym mankamentem takiego rozwiązania jest (na ogół) nieciągłość sterowania występująca w momencie przełączania sterowników. W konsekwencji trudno jest przewidzieć zachowanie się obiektu tuż po przełączeniu. Może np. wystąpić w skrajnych przypadkach utrata stabilności.
3. W przypadku badania stabilności dynamiki zerowej Autor dokonuje jej linearyzacji w otoczeniu punktu równowagi a następnie wykorzystując I Twierdzenie Lapunowa stara się wydedukować typ stabilizacji lub jej brak. W przypadkach nieujętych I Twierdzeniem Lapunowa Autor przeprowadza symulację zachowania się trajektorii dynamiki zerowej dla różnych warunków początkowych. Stwierdzenie stabilności lub nie w takiej sytuacji jest jednak obciążone dużym stopniem niepewności. Warunki niestabilności systemu dynamicznego w przypadkach wątpliwych podaje np. Twierdzenie Czetajewa.
4. Wydaje się że we wzorze 2.3 brakuje składnika $\dot{M}(q)\dot{q}$.

5. Redakcja pracy zawiera pewne błędy stylistyczne i maszynowe (np. na stronie 50 jest znajdzie się poblizu a powinno być znajdzie się w poblizu). Większość z nich zaznaczyłem bezpośrednio w tekście pracy i przekazałem Autorowi.

Powyższe uwagi mają częściowo charakter dyskusyjny, inne natomiast powinny być dokładnie sprawdzone przez Autora. Nie wpływają one jednak na pozytywną ocenę pracy.

Uważam, że opiniowana rozprawa doktorska mgra inż. Pawła Parulskiego spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytule naukowym. Wnoszę więc o jej przyjęcie i dopuszczenie Autora do publicznej obrony.

Z uwagi na ogrom pracy poczyniony przez Autora, wagę otrzymanych wyników oraz ilość udokumentowanych publikacjami wyników częściowych z dysertacji, a także możliwości wykorzystania osiągnięć Autora w praktyce, wnoszę o wyróżnienie rozprawy mgra inż. Pawła Parulskiego.

Mikołaj Galiński