

dr hab. inż. Andrzej Dzieliński, prof. PW
Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej
Wydział Elektryczny
Politechnika Warszawska

Warszawa, 31.07.2014

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Pana
mgra inż. Piotra Ducha,

pt. „Optymalizacja algorytmów numerycznych wykorzystujących równania różnicowe całkowitych i niecałkowitych rzędów”

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Prodziekana Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki i Automatyki Politechniki Łódzkiej, prof. dr hab. inż. Andrzeja Bartoszewicza, z dnia 5 czerwca 2014.

1. Teza, cel i problematyka rozprawy

Rozprawa doktorska Pana Piotra Ducha dotyczy problemów wykorzystania metod i algorytmów rachunku różniczkowego i różnicowego niecałkowitego rzędu do rozwiązania problemów sterowania w złożonych systemach robotyki. Problematyka ta jest ważna z zarówno z teoretycznego, ale przede wszystkim z praktycznego punktu widzenia. Wykorzystanie istniejących i tworzenie nowych urządzeń i systemów robotyki, a w szczególności proponowanie nowych bardziej wydajnych sposobów ich sterowania oraz implementacji tych metod jest bardzo ważnym obszarem we współczesnych zastosowaniach teorii sterowania. Tematyka ta tradycyjnie należy do obszaru z pogranicza teorii sterowania, automatyki przemysłowej, robotyki i przetwarzania sygnałów. W ostatnich latach również zyskuje na znaczeniu stosunkowo nowa (choć jej historia sięga XVII wieku) dziedzina matematyki jaką jest rachunek różniczkowy i różnicowy niecałkowitego rzędu. Dziedzina ta rozwija się bardzo dynamicznie w szczególności jeśli chodzi o wyniki teoretyczne już od co najmniej kilkudziesięciu lat. Natomiast jej zastosowania mają znacznie krótszą historię sięgającą ostatnich kilkunastu lat i są jeszcze ciągle stosunkowo nieliczne. Zaś zastosowania w sterowaniu, a zwłaszcza w robotyce są ciągle na bardzo wczesnym etapie. Można powiedzieć, że problematyka poruszana w pracy trafia idealnie w zapotrzebowania zgłaszane przez automatykę i robotykę na efektywniejsze i skuteczniejsze metody i algorytmy, a jednocześnie korzysta z narzędzi oferowanych przez dynamicznie rozwijającą się dziedzinę o potencjalnie

wielkich możliwościach aplikacyjnych. Autor recenzowanej pracy postawił przed sobą ambitne zadanie zbudowania algorytmów wykorzystujących rachunek różnicowy niecałkowitego rzędu oraz ich zaimplementowanie w sposób zbliżony do optymalnego w systemie sterowania robotem mobilnym. Ten sposób postawienia problemu wydaje mi się jak najbardziej właściwy, i tym samym recenzowana praca wpisuje się w istotny i interesujący nurt badawczy. W obszarach objętych tematyką pracy pozostaje ciągle wiele nierozwiązanych problemów, zwłaszcza o charakterze praktycznym i ich skuteczne rozwiązanie może być bardzo wartościowe. Autor recenzowanej rozprawy doktorskiej podjął się niełatwego zadania wypełnienia tej luki i przedstawienia nowych, oryginalnych rezultatów z tej dziedziny.

Dwie tezy postawione przez Autora w pracy mówią, że:

po pierwsze: „Zastosowanie uproszczonych postaci różnic i sum niecałkowitych rzędów pozwoli znacznie zmniejszyć czas obliczeń i wykorzystanie pamięci układu mikroprocesorowego realizującego algorytmy wykorzystujące równania różnicowe niecałkowitych rzędów”.

po drugie: „W przypadku różnic i sum niecałkowitych, zmiennych rzędów przyjęcia specjalnych funkcji rzędów pozwoli uniknąć problemów związanych z liniowo narastającym czasem obliczeń i wykorzystaniem pamięci.”

Są to zgodnie z moją wiedzą tezy oryginalne. Jakkolwiek istnieje szereg metod optymalizacji algorytmów wykorzystujących rachunek różnicowy niecałkowitego rzędu to jednak większość z nich posiada pewne wady i/lub ograniczenia. Na pewno opracowanie odpornych i efektywnych nowych metod komunikacji opartych na solidnej teorii i stosunkowo nietrudnych w implementacji jest zadaniem ambitnym i wartym postawienia. Wykazanie powyższych tez pozwala na stworzenie solidnej podstawy dla praktycznych inżynierskich metod projektowania złożonych systemów automatyki i robotyki przemysłowej. Problematykę pracy uważam za aktualną, trafnie dobraną i dającą możliwość osiągnięcia interesujących rezultatów teoretycznych, o poważnych implikacjach praktycznych.

Opiniowana rozprawa doktorska liczy 166 stron i składa się z dziewięciu zasadniczych rozdziałów, obszernego spisu literatury zawierającego 225 pozycji

najważniejszych prac z przede wszystkim z dziedziny rachunku różniczkowego i różnicowego niecałkowitego rzędu, teorii sterowania, automatyki przemysłowej, ale również robotyki i przetwarzania obrazów. W rozdziale pierwszym Autor pracy przedstawia wprowadzenie do tematyki pracy, prezentuje podstawy problematyki wykorzystania rachunku różniczkowego niecałkowitego rzędu oraz omawia zawartość rozprawy. W rozdziale tym znajduje się również sformułowanie celu pracy i jej tezy oraz ogólna charakterystyka osiągniętych rezultatów. W rozdziale drugim Autor przedstawia opis systemu robota mobilnego, który stanowi platformę testową implementowanych metod i algorytmów. W rozdziale trzecim zawarty jest opis problematyki sterowania mikroprocesorowego i jego ograniczeń, zaś w rozdziale czwartym Autor wprowadza podstawowe pojęcia i problemy rachunku niecałkowitego rzędu. Rozdział piąty zaś jest poświęcony wprowadzeniu do regulatorów PID zmiennych, niecałkowitych rzędów. Wydaje się, że szczególnie rozdziały trzeci, czarty i piąty można by znacznie skrócić pomijając powszechnie znane i/lub łatwo dostępne w literaturze informacje. W rozdziale ostatnim, dziewiątym przedstawione zaś są wnioski, uwagi końcowe i podsumowanie wykonanych prac. Główne rezultaty pracy zostały zawarte w rozdziałach szóstym, siódmym i ósmym.

W rozdziale szóstym Autor przedstawia swoją propozycję praktycznej implementacji algorytmu realizującego regulator PID zmiennych, niecałkowitych rzędów. Autor dokonuje optymalizacji algorytmu pod względem wykorzystania pamięci oraz pod względem szybkości działania. Udaje się ot uzyskać poprzez odpowiedni dobór funkcji rzędów sumowania i różnicowania oraz dobór metody wyznaczania sum i różnic niecałkowitych rzędów.

Rozdział siódmy pracy zawiera weryfikację opracowanej i przedstawionej w rozdziale szóstym realizacji algorytmu w zamkniętym układzie sterowania ramienia robota przestawionego w rozdziale drugim.

Wreszcie w rozdziale ósmym znajduje się opis zastosowania algorytmów opisanych równaniami niecałkowitych rzędów do przetwarzania obrazu otrzymanego z kamery zamocowanej na ramieniu robota. Chodzi tu w szczególności o algorytm wykrywania krawędzi.

Rozdział dziewiąty, jest podsumowaniem pracy i podkreśleniem osiągniętych w niej wyników z jasno uwzględnionym oryginalnym wkładem Autora pracy.

2. Ocena rozprawy

Uwagi ogólne

Przedstawioną pracę doktorską oceniam pozytywnie. Autor z powodzeniem rozwiązał szereg trudnych problemów naukowych i inżynierskich. Zastosował przy tym poprawne metody projektowania złożonych układów regulacji w mobilnych systemach sterowania. Ponadto rozprawa zawiera dużą ilość informacji na temat praktycznych i teoretycznych aspektów sterowania robotami mobilnymi oraz szereg szczegółów dotyczących stosowanych metod, algorytmów i technologii informatycznych, co świadczy o szerokiej i pogłębionej wiedzy Autora w dziedzinach wchodzących w zakres prezentowanej rozprawy.

Za główne osiągnięcia pracy uważam:

1. opracowanie oryginalnej metody wyliczania w czasie rzeczywistym różnicy i sumy wstecznej niecałkowitych, zmiennych w czasie rzędów,
2. podanie warunków dotyczących doboru funkcji całkowania i różniczkowania zapewniających stabilność układu zamkniętego,
3. opracowanie metody sterowania ramieniem robota mobilnego realizującego algorytm PD zmiennych, niecałkowitych rzędów zoptymalizowany pod względem czasu obliczeń oraz wykorzystania pamięci
4. Opracowanie oryginalnej metody wykrywania krawędzi obrazu, która wykorzystuje rachunek różnicowy niecałkowitych rzędów.

Liczba i waga oryginalnych wyników uzyskanych przez Autora i opisanych w recenzowanej rozprawie doktorskiej skłania mnie do wyrażenia o niej pozytywnej opinii merytorycznej.

Lektura praca skłania mnie wszakże do wyrażenia kilku uwag krytycznych i wątpliwości wymienionych poniżej. Uwagi te mają charakter dyskusyjny i nie obniżają ogólnej pozytywnej oceny pracy.

Uwagi krytyczne i pytania:

1. Pracę uważam za cenny wkład do dziedziny sterowania robotami mobilnymi przy wykorzystaniu metod rachunku różnicowego niecałkowitych rzędów. Nie do końca jestem jednak pewny czy zysk w jakości z sterowania na poziomie od 3 do 18 procent wartości sumowych wskaźników jakości prezentowanych w pracy na stronach 119-121 (Tabele 7.1 do 7.3) w stosunku do klasycznego regulatora PD jest wystarczającym uzasadnieniem stosowania znacznie bardziej skomplikowanego regulatora VFOPD. Czy rzeczywiście obiekt sterowania ma charakter niecałkowitego rzędu?
2. W pracy Autor przedstawia model dolnego ramienia robota (Rysunek 7.4), po czym przedstawia równanie różniczkowe niecałkowitego rzędu (7.2) otrzymane na podstawie analizy odpowiedzi skokowych (?) ramienia i odpowiadające temu modelowi. Czy równanie 7.2 da się uzyskać w sposób analityczny? Czy była przeprowadzona walidacja tego modelu?
3. Autor w Rozdziale 6.2.1 prowadzi rozważania dotyczące doboru funkcji rzędów sumowania i różnicowania. W wyniku tych rozważań podane zostają warunki, które powinny spełniać takie funkcje aby układ zamknięty był stabilny oraz gwarantował zerowy uchyb ustalony (równania 6.1 do 6.4). Po czym Autor stwierdza, że można jeszcze narzucić inne wymagania np. monotoniczność i wówczas możemy otrzymać przykładowe funkcje (6.5), do (6.8). W dalszej części pracy takie właśnie funkcje są stosowane w implementacjach. Czy jest jakieś istotne uzasadnienie wprowadzenia akurat takiego warunku? Czy dodanie innych warunków zmieniłoby wynik implementacji?
4. Czy Autor prowadził analizę doboru innych parametrów regulatora VFOPD, wzmocnienia i stałej czasowej różniczkowania a także długości „ogona obliczeniowego”? Jakich można spodziewać się wyników?
5. Autor stosuje układ niecałkowitego, zmiennego rzędu. W literaturze istnieje szereg definicji tego typu układów (patrz np. prace Duarte Valerio lub Dominika Sierociuka). Czy Autor próbował również stosować inne definicje?

Wniosek końcowy

Recenzowana praca doktorska jest interesującą próbą rozwiązania ważnego z praktycznego punktu widzenia problemu sterowania robotem mobilnym przy wykorzystaniu rachunku różnicowego niecałkowitego rzędu. Jest to jeden z istotnych problemów badawczych w dyscyplinie automatyka i robotyka. W mojej ocenie recenzowana praca dobrze wpisuje się w tę dyscyplinę. Praca napisana i skomponowana jest poprawnie. Jej redakcja nie budzi większych zastrzeżeń, aczkolwiek Autor pracy nie ustrzegł się drobnych błędów redakcyjnych. Praca jest objętościowo obszerna i zawiera oprócz oryginalnych wyników Autora również wyprowadzenie i omówienie szeregu zagadnień z dziedziny sterowania, robotyki i informatyki, co może być pomocne dla mniej wprowadzonego w zagadnienie czytelnika i świadczy o szerokiej wiedzy Autora w omawianych dziedzinach, ale również nieco rozprasza czytelnika. Autor postawił sobie w pracy ważne zadania badawcze i przedstawił oryginalne metody jego rozwiązania. Metody te jak wykazano w pracy są właściwe. Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i w istotny sposób nie umniejszają całkowitej pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej. Na wyróżnienie zasługuje fakt opublikowanie wyników pracy w 20 artykułach naukowych, w tym 5 w czasopismach punktowanych. W związku z powyższym stwierdzam, że praca spełnia wymogi określone w Artykule 13, punkt 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki (D.U. nr 65 z 16 kwietnia 2003, poz. 595) i wnioskuję o dopuszczenie Pana mgra inż. Piotra Ducha, do publicznej obrony pracy doktorskiej.

