

Prof. dr hab. inż. Janusz Kowal

Kraków, 21 października 2015 r.

Katedra Automatykacji Procesów

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

R E C E N Z J A

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Andrzeja Felisiaka
pt.: *Control of spacecraft for rendezvous maneuver in an*
elliptical orbit

Promotor: Prof. dr hab. inż. Krzysztof Sibilski

Promotor pomocniczy: dr inż. Wiesław Wróblewski

1. Wprowadzenie i ogólna ocena rozprawy

W pracy zajmowano się problematyką sterowania statkiem kosmicznym podczas manewru spotkania statku z obiektem docelowym. Orbitalny manewr spotkania polega na obraniu przez statek kosmiczny oraz obiekt docelowy takich samych wektorów prędkości i położenia względem Ziemi obu w tym samym momencie. Współczesne kierunki rozwoju technologii automatycznego sterowania statkiem kosmicznym dla zagadnienia manewru spotkania skupione są na zwiększeniu autonomii statków wykonujących manewr, zapewnieniu bezpieczeństwa podczas manewru oraz umożliwienia wykonania przez statek manewrów improwizowanych. Również zdecydowana większość manewrów spotkania została opisana i zrealizowana na orbitach kołowych, dla niewielkich odległości początkowych, mniejszych niż jeden kilometr. Studia literaturowe wskazują, że stosowane aplikacje sterowania predykcyjnego oparte są wyłącznie o modele liniowe ruchu względnego. Ma to negatywny wpływ na dokładność tych modeli, która zanika wraz ze zwiększaniem odległości początkowej między statkiem a obiektem docelowym. Brak jest również prac, w których wykorzystuje się pełny model nieliniowy oraz badań w zakresie powiększania względnej odległości początkowej. Autor rozprawy podjął próbę opracowania względnie prostego i niezawodnego regulatora predykcyjnego dla układów niestacjonarnych i nieliniowych i wykorzystał go do sterowania statkiem kosmicznym, w celu wykonania manewru spotkania, przy założeniu, że satelita docelowy przemieszcza się po keplerowskiej orbicie eliptycznej. Na tle tak zidentyfikowanych problemów Autor sformułował tematykę swojej rozprawy w obszarze technologii spotkania. Zaproponowana metoda sterowania wpisuje się w tendencje panujące obecnie w technice kosmicznej. Pomimo istniejących badań w tym zakresie uważam, że jest to wysoce aktualna tematyka. Należy zatem uznać, że

przedstawiony w pracy problem badawczy jest ważnym zagadnieniem, przez co wybór tematu i zakresu opiniowanej pracy doktorskiej jest trafny i uzasadniony. Zaproponowane podejście rozszerza zakres wiedzy w zakresie konstrukcji i sterowania tego typu obiektami. Praca ma charakter teoretyczny i interdyscyplinarny, a opracowany algorytm został zweryfikowany na drodze badań symulacyjnych.

2. Ocena merytoryczna rozprawy

Opiniowana rozprawa ma wysoki poziom merytoryczny. Poszczególne rozdziały stanowią logiczną całość a zawarte w nich treści są, w zdecydowanej większości, proporcjonalne do wagi prezentowanej w nich problematyki. Zawartość rozprawy, dokumentująca rozważania teoretyczne oraz bardzo obszerne badania symulacyjne, wykonane przez Autora, została zawarta na 113 stronach tekstu. Autor zredagował pracę w 6 głównych rozdziałach, uzupełnionych oceną zaproponowanego rozwiązania problemu (rozdział 7), wnioskami końcowymi i propozycjami dalszych badań (rozdział 8), oraz wykazem 86 pozycji literatury. Ponadto praca zawiera; streszczenia w języku angielskim i polskim, wykaz ważniejszych oznaczeń, wykaz 40 rysunków i 10 tablic oraz załącznik.

W rozprawie można wyróżnić trzy zasadnicze części obejmujące: modelowanie obiektu sterowania oraz teoretyczne aspekty sterowania predykcyjnego (rozdz. 2 i 3), projektowanie i implementacja systemu sterowania (4 i 5) oraz badania symulacyjne zaproponowanego systemu (rozdz. 6).

Rozdział pierwszy rozprawy zawiera genezę poruszanej tematyki pracy, obszerny przegląd literatury dotyczącej sterowania statkiem kosmicznym podczas manewru spotkania oraz cel, tezę i zakres pracy. Celem pracy było opracowanie regulatora predykcyjnego zdolnego do sterowania ruchem względnym statku kosmicznego, który ze względu na swoją nieliniowość jest wymagającym obiektem sterowania. Autor formułuje następujące tezy pracy:

- Zaproponowany przez Autora algorytm pozwala na znalezienie sterowania quasi-optimalnego, dla zagadnienia manewru spotkania na orbicie eliptycznej, prowadzącego do osiągnięcia celu sterowania.
- Uwzględnienie ewolucji parametrów modelu wzdłuż horyzontu predykcji regulatora, pozwala na poprawienie jakości sterowania.
- Wykorzystanie przez regulator pełnego modelu nieautonomicznego, w znaczący sposób rozszerza przestrzeń warunków początkowych, dla których możliwe jest osiągnięcie celu sterowania.
- Sukcesywna linearyzacja wraz z zaproponowaną przez autora metodą przewidywania parametrów modelu, pozwala na zredukowanie zadania optymalizacji, do problemu optymalizacji kwadratowej.

Dla realizacji tak sformułowanego celu i udowodnienia postawionych tez zakres pracy obejmuje:

- Sformułowanie modelu orbitalnego ruchu względnego w dziedzinie czasu oraz systematyzację wiedzy w tym zakresie. Założono, że model w bezpośredni sposób uwzględnia zmienną masę statku wykonującego manewr.
- Opracowanie mechanizmu predykcji parametrów modelu wzdłuż horyzontu predykcji regulatora.

- Zaprojektowanie oraz implementację algorytmu sterowania predykcyjnego, realizującego postawione zadanie sterowania.
- Przeprowadzenie szeregu eksperymentów numerycznych pozwalających ocenić jakość sterowania.

W rozdziale drugim Autor formułuje model matematyczny obiektu sterowania. Buduje pełny nieliniowy oraz niestacjonarny model ruchu względnego, który uwzględnia zależność dynamiki procesu od masy gazu pędnego wyrzucanego przez silniki statku. Posłuży on jako model wewnętrzny dla regulatora predykcyjnego, pozwalając na predykcję wyjścia oraz estymację stanu procesu.

Kolejne blisko 30 stron, stanowiących **rozdział trzeci i czwarty**, Autor w całości poświęcił zagadnieniom związanym z projektowaniem sterowania predykcyjnego. Sterowanie predykcyjne wydaje się być jedną z niewielu skutecznych w praktyce metod sterowania układami nieliniowymi przy ograniczeniach sterowania i stanu. Daje bowiem możliwość uwzględnienia ograniczeń nałożonych na wielkości regulowane i sterujące w trakcie projektowania regulatora. Ponadto algorytmy sterowania predykcyjnego charakteryzują się małą wrażliwością na zmiany parametrów obiektu, odpornością na nie-minimalnofazowość obiektu oraz możliwością sterowania obiektów trudnych (niestabilnych, niestacjonarnych i nieliniowych). Autor wykorzystał opracowany model ruchu względnego jako model wewnętrzny dla regulatora predykcyjnego, co pozwoliło na predykcję wyjścia oraz estymację stanu procesu. Kolejnym założeniem, było wykorzystanie kwadratowego kryterium jakości do rozwiązywania zagadnienia sterowania optymalnego. Autor sprowadza procedurę optymalizacji do programowania kwadratowego, wykorzystując opracowaną metodę, polegającą na generacji lokalnych modeli liniowych wzdłuż horyzontu predykcji. Ponieważ metoda ta uwzględnia zmienność parametrów modelu wzdłuż horyzontu predykcji, pozwala to na dokładniejszą prognozę wyjścia procesu. Zależność parametrów modelu od trajektorii sterowania wymusiła zastosowanie heurystycznej metody, do wstępnej estymacji przyszłej trajektorii sterowania. Autor uniknął w ten sposób, bezpośredniego uwzględnienia zależności parametrów modelu od trajektorii sterowania w procedurze optymalizacji. Projektowanie regulatora predykcyjnego z modelem obiektu w przestrzeni zmiennych stanu, wymagało również zaprojektowania obserwatora stanu. Jako predyktor zmiennych stanu, czyli układ wyliczający przyszłe próbki zmiennych stanu oraz sygnałów sterujących, Autor wykorzystuje filtr Kalmana.

W rozdziale piątym Autor przedstawia implementację systemu sterowania w środowisku Matlab z wykorzystaniem technik programowania zorientowanego obiektowo. Przeprowadzone i zaprezentowane w rozdziale szóstym weryfikacyjne badania symulacyjne potwierdziły postawione tezy pracy.

W rozdziałach siódmym i ósmym Autor bliżej omawia wyniki oraz dokonuje oceny zaproponowanego rozwiązania. Ostatni rozdział zawiera podsumowanie pracy i propozycje dalszych badań. W mojej ocenie cel pracy został osiągnięty. Autor opracował nowatorski algorytm sterowania predykcyjnego pozwalający na wyznaczenie sterowania dla manewru spotkania, kiedy obiekt docelowy porusza się po orbicie eliptycznej a odległość początkowa między obiektami jest duża (36000 km).

Za główne osiągnięcia Doktoranta uważam:

- Wyprowadzenie nieliniowego modelu ruchu względnego, przeprowadzone przez Autora w sposób częściowo alternatywny do spotykanego w literaturze.

- Opracowanie modelu masy statku wykonującego manewr, użytego później do sformułowania oryginalnego, rozszerzonego modelu obiektu sterowania pozwalającego na uwzględnienie wpływu zmiennej masy statku na dynamikę wyjść obiektu.
- Sformułowanie mechanizmu predykcji parametrów modelu wzdłuż horyzontu predykcji, wykorzystującego heurystyczną metodę wstępnej estymacji trajektorii sterowania.
- Opracowanie systemu predykcji trajektorii wyjścia, uwzględniający zmienność parametrów modelu wzdłuż horyzontu predykcji.
- Zaprojektowanie oraz implementacja nowatorskiego regulatora predycyjnego, pozwalającego na osiągnięcie celu sterowania ruchem względnym, przy założeniu względnie dużych wartości separacji początkowej oraz mimośrodu orbity obiektu docelowego.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Uwagi jakie nasuwają się po lekturze pracy mają charakter ogólny i redakcyjnych. Zauważyć należy, że rozprawa jest bardzo starannie przygotowana zawiera jednak nieco różnorodnych usterek redakcyjnych oraz edytorskich. Niektóre z nich zaznaczyłem w tekście. Mogą one utrudniać nieco lekturę lub prowadzić do pewnych wątpliwości. Poniżej zamieszczam uwagi do recenzowanej pracy:

1. Język angielski używany w pracy jest w pełni zrozumiały, lecz zawiera szereg usterek. Praca zyskałaby, gdyby przed jej opublikowaniem przeprowadzono korektę językową.
2. Modelowanie siły odrzutu przy pomocy równania (2.94) str. 33, wydaje się nie być zgodne z dynamiką układów o zmiennej masie (równanie Mieszczerskiego). Równanie to nie zawiera prędkości względnej odłączania masy. Proszę o wyjaśnienie tego równania.
3. W pracy całkowicie pominięto zagadnienia dotyczące badania stabilności zaproponowanych algorytmów sterowania i ich odporności na zakłócenia. Porównania różnych algorytmów dokonano wykorzystując kryterium „czasu do spotkania” przy porównywalnym zużyciu paliwa.
4. Wprowadzając do zadania optymalizacji liniowo-kwadratowej ograniczeń na sygnał sterujący powoduje, że rozwiązania nie można wyznaczyć standardowymi metodami rozwiązując macierzowe równanie Riccatiego. Jaką metodę zastosowano do wyznaczenia rozwiązania optymalnego?
5. Jaka jest zależność pomiędzy wskaźnikami jakości zdefiniowanymi wzorami (4.59) i (4.68). W przypadku zadania optymalizacji zdefiniowanego wzorami od (4.68) do (4.71), (ze wskaźnikiem jakości 4.68), wydaje się, że sterowanie zerowe $\Delta U=0$ jest rozwiązaniem optymalnym. Czy rozwiązanie zadania optymalizacji nie powinno być wyznaczane dla wskaźnika jakości określonego wzorem (4.59)?
6. Przyjęto, że dla zadanego horyzontu optymalizacji współczynniki macierzy A_{rm} , B_{rm} są stałe. Czy Autor przeprowadził eksperymenty numeryczne umożliwiające porównanie pomiędzy wyznaczoną trajektorią suboptymalną a trajektorią optymalną?
7. Rozwój techniki spowodował wzrost mocy obliczeniowej aktualnie dostępnych komputerów. Czy wyznaczenie trajektorii optymalnej przy założeniu, że współczynniki macierzy A_{rm} , B_{rm} nie są stałe, jest możliwe w czasie rzeczywistym?

8. Formułując zadanie optymalizacji liniowo-kwadratowej współczynniki macierzy wagowej R można dobierać w szerokim zakresie. W jaki sposób dobierano współczynniki macierzy wagowej R we wskaźniku jakości (4.57)?
9. Na stronie 70 Autor pisze, że parametry regulatora zostały dobrane w sposób zapewniający najlepszą regulację, dla każdego przypadku. W jaki sposób wyznaczono optymalne wartości tych parametrów?
10. Dla symulacji V : algorytmu MPC-EMP otrzymano około 10 krotnie wyższe wartości sygnałów sterujących (sił) niż w poprzednich przypadkach. Z czego wynikają tak duże wartości sił dla przypadku o stosunkowo małej względnej początkowej odległości satelitów? Dlaczego w tym przypadku było konieczne przyjęcie tak dużych wartości ograniczeń na sterowanie?
11. Rozdział 8 „Conclusion and Future Work” nie zawiera wniosków. W podrozdziałach 8.1 i 8.2, Autor podaje raczej zawartość poszczególnych rozdziałów.

Przedstawione wyżej, szczegółowe i ogólne uwagi krytyczne i dyskusyjne, nie umniejszają wartości rozprawy, którą oceniam bardzo pozytywnie. Traktuję je raczej, jako wskazówki dla Autora, bowiem nie dotyczą one głównego nurtu pracy. Mają raczej na celu poprawienie precyzjności rozważań, a nie pokazanie Autorowi usterek merytorycznych.

4. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że sformułowane przeze mnie uwagi krytyczne nie umniejszają osiągnięć Doktoranta, który udowodnił, że potrafi poprawnie sformułować i postawić istotne zadanie badawcze, którym było sterowanie statkiem kosmicznym podczas manewru spotkania. Doktorant potrafił sformułować i przyjąć jednoznaczne cel i tezy pracy, planować i prowadzić teoretyczne badania naukowe oraz zweryfikować je na drodze numerycznej.

Opracowana metoda sterowania quasi-optymalnego podczas manewru spotkania wnosi oryginalny i istotny wkład Autora w rozwój metod sterowania statkami kosmicznymi podczas manewru spotkania. Rozwiązanie to ma istotne zalety, w stosunku do wcześniejszych znanych z literatury. Doktorant wykazał się dużą wiedzą teoretyczną oraz wymaganą umiejętnością postawienia zagadnienia i rozwiązania go na drodze teoretycznej oraz zweryfikować metodą symulacji numerycznych. Jego wywody są jasne a wyniki rozprawy mogą być użyteczne z naukowego jak i technicznego punktu widzenia.

Wobec spełnienia wszystkich wymogów obowiązującej Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym, stawiam wniosek o przyjęcie pracy i dopuszczenie mgr inż. Piotra Andrzeja Felisiaka do jej publicznej obrony. Jednocześnie wnoszę o wyróżnienie rozprawy.

