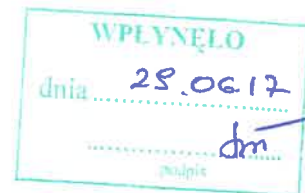


Dr hab. inż. Ryszard Leniowski, prof. PRz
Katedra Informatyki i Automatyki
Wydział Informatyki i Elektrotechniki
Politechnika Rzeszowska
lery@prz-rzeszow.pl

Rzeszów, 7 czerwiec 2017 r.



Recenzja pracy doktorskiej

Tytuł rozprawy: **Nanosatellite attitude estimation**

Autor rozprawy: **mgr inż. Paweł Zagórski**

Promotor rozprawy: **prof. dr hab. inż. Wojciech Grega**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Zagórskiego, która została opracowana na prośbę Dziekana Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Akademii Górniczo- Hutniczej w Krakowie, dr hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. n.

Ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy metod estymacji orientacji sztucznych satelitów Ziemi, tzw. nanosatelitów, o bardzo małej masie własnej, mieszczącej się w zakresie od 1 do 10 kg. Szybki postęp technologiczny w naukach technicznych (miniaturyzacja sprzętu komputerowego i układów pomiarowo-wykonawczych) umożliwił skonstruowanie w pełni funkcjonalnych nanosatelitów w 2000 roku. Od tego momentu do końca 2015 roku w okołoziemskiej przestrzeni kosmicznej umieszczono ponad 400 takich obiektów, większość w latach 2013-2015. W następnych 2 latach, tj. 2016-2017 liczba ta zostanie podwojona, trudno prognozować, co stanie się w kolejnych latach.

W związku z powyższym, pojawiła się potrzeba opracowania nowych metod i narzędzi, zapewniających prawidłowe i długotrwałe funkcjonowanie nanosatelitów i uwzględniających ich specyficzne cechy. Jednym z ważniejszych problemów, szczególnie istotnym dla tak małych obiektów kosmicznych, jest utrzymywanie referencyjnej orientacji lub jej planowana zmiana. Ponieważ obiekt jest poddawany silnym zakłóceniom, którymi są momenty sił pochodzące od oddziaływań grawitacyjnych, aerodynamicznych, magnetycznych, promieniowania (głównie słonecznego) oraz ruchu podzespołów ruchomych nanosatelity, sterowanie orientacją takiego obiektu jest bardzo trudne. Kluczowym zadaniem jest pozyskiwanie wiarygodnych danych z układu pomiarowego, zawierającego zwykle kilka sensorów (pomiaru bezpośrednie i pośrednie), na podstawie których przeprowadza się estymację jego orientacji. Niniejsza

rozprawa doktorska jest przykładem odpowiedzi na zapotrzebowanie, jakie pojawiło się wraz z powstaniem nanosatelitów.

Przedstawiona praca liczy 96 stron, nie wliczając streszczenia, spisu literatury i trzech dodatków o objętości 8 stron. Praca została napisana w języku angielskim. Jej redakcja jest bardzo staranna, przejrzysta z widoczną dbałością o szczegóły. Układ pracy jest klasyczny i nie budzi zastrzeżeń.

Zakres rozprawy

Rozprawa porusza kilka różnych zagadnień powiązanych w sposób bezpośredni z zadaniem estymacji orientacji nanosatelitów. Trzy z nich mają charakter pomocniczy i dotyczą parametryzacji orbit i orientacji, modelowania ruchu oraz oddziaływań zewnętrznych, modelowania sensorów oraz metod sterowania orientacją. W ten sposób autor przechodzi do zaprezentowania propozycji algorytmu estymacji orientacji, wykorzystującego dwa sensory ruchu: pomiaru położenia słońca za pomocą specjalnej kamery oraz żyroskopu 3D. Opisuje proces strojenia wzmacnień i wag sygnałów oraz zamieszcza uwagi dotyczące jego zbieżności. Algorytm ten (podobnie jak wiele innych rozwiązań) wprowadza do wzoru estymującego (5.10) poprawkę, wyznaczaną na podstawie predykcji orientacji z pomiaru żyroskopowego. W ten sposób jest on mniej wrażliwy w zakresie małej wartości wzmacnienia dla głównego toru pomiarowego. Potwierdzenie skuteczności proponowanego algorytmu odbywa się na drodze symulacyjnej, z wykorzystaniem narzędzi *CelestLab* i *Aerospace Blockset*, współpracujących z pakietem MATLAB/Simulink. Wykonane testy odnoszą się do eksperymentów z jednym, identycznym czasem próbkowania oraz do eksperymentów z różnymi czasami próbkowania dla torów pomiarowych. Autor nie zamieszcza jednak żadnych opisów implementacji proponowanych metod, z wyjątkiem skromnych schematów (rys.6.9, rys. 6.13, rys. 6.15), co budzi niedosyt i utrudnia ocenę proponowanego algorytmu w odniesieniu do innych rozwiązań. Na zakończenie Autor prezentuje plan przyszłych eksperymentów uwzględniających czasową niedostępność danych (np. na skutek zaćmienia Ziemi) oraz sprawdzenie algorytmów dla nanosatelity Lithuanica SAT-2, powstającego w ramach innego projektu.

Praca nie zawiera również badań doświadczalnych, których przeprowadzenie zdaniem recenzenta nie byłoby trudne. Powszechna dostępność gotowych (i tanich) modułów pomiarowych z sensorami MEMS (np. wspomniany żyroskop MAG3110) oraz miniaturowych kamer umożliwia zaaranżowanie lotu nanosatelity w skromnych warunkach laboratoryjnych.

Zawartość rozprawy

Rozprawa składa się z 7 rozdziałów, włączając w to Wstęp i Podsumowanie, ponadto zawiera Dodatek z trzema podpunktami. Autor ma w zakresie tematu rozprawy niewielki

dorobek publikacyjny, obejmujący dwa artykuły w czasopismach z listy B MNiSW oraz jedną współautorską pracę konferencyjną.

Rozdział pierwszy to krótki wstęp zawierający streszczenie problemów, główne tezy oraz opis struktury pracy.

Rozdział drugi poświęcony jest parametryzacji orientacji bryły w przestrzeni trójwymiarowej. Definiowane są różne układy odniesienia oraz ważniejsze pojęcia z inżynierii kosmicznej. Następnie Autor przedstawia trzy alternatywne standardy parametryzacji orientacji bryły sztywnej, skupiając swoją uwagę na zapisie kwaternionowym.

Rozdział trzeci dotyczy zadań modelowania nanosatelitów z uwzględnieniem oddziaływań zewnętrznych oraz problemu sterowania orientacją. Rozpoczyna się on od ważnego zestawienia (tabela 3.1), pokazującego podział urządzeń na klasy. Na szczególną uwagę zasługuje fakt uwzględnienia sztucznych obiektów kosmicznych o masie rzędu kilku gramów. Dziś trudno sobie wyobrazić przeznaczenie tak małych urządzeń, może z wyjątkiem wojskowego „piasku satelitarnego” do zwalczania satelitów przeciwnika. W dalszej części rozdziału Autor analizuje źródła i skalę zakłóceń wpływających bezpośrednio i pośrednio na orientację. Ważny jest rys.3.7, wskazujący na bilans zakłóceń w funkcji parametrów orbity. Nie uwzględnia on jednak temperatury, która na wysokości ok. 7000 km (dla rozważanego satelity Lithuanica SAT-2) jest bardzo niska. Jednak dla tak rozrzedzonej materii kosmicznej wymiana ciepła zachodzi jedynie przez promieniowanie. Powstaje pytanie, czy dla nanosatelity, o raczej skromnej izolacji termicznej, ilość wytwarzanej energii jest wystarczająca, aby utrzymać temperaturę układów elektronicznych w bezpiecznym zakresie? Autor prezentuje również przegląd sensorów i metod określania orientacji oraz stosowaną metodę sterowania orientacją za pomocą sił Lorentza, wytwarzanych przez układ cewek. W części końcowej omawiane są metody estymacji orientacji koncentrujące się na wykorzystaniu rachunku kwaternionowego. Prezentowana jest lista kilkunastu znanych już algorytmów estymacji orientacji. Nie uwzględnia ona jednak kilku ciekawych algorytmów, np. QPFEST (Quaternion Particle Filter Estimator), USQUE (Uncentred Quaternion Estimator), GA-QPF (Genetic Algorithm-Embedded Quaternion Particle Filter).

Rozdział czwarty, dość krótki, prezentuje modele generowania danych: pola magnetycznego, pozycji i widzialności słońca oraz model cienia rzucanego przez Ziemię na kierunku Słońca.

Rozdział piąty jest rozdziałem głównym, gdzie przedstawiono propozycję algorytmu estymacji orientacji o nazwie SDQAE. Istotą algorytmu jest wykorzystanie schematu obliczeniowego typu: predyktor- korektor, gdzie dane z żyroskopu trafiają do bloku predykcji, zaś pozostałe sensory (np. kamera obserwacji słońca, magnetometr) są przetwarzane w bloku korekcji. Rozdział zawiera opis strojenia wag i wzmocnień w pętlach algorytmu oraz uwagi dotyczące stopnia zbieżności w kontekście wzajemnej konfiguracji wektorów pomiarowych strumienia pola magnetycznego i wektora położenia Słońca.

Rozdział szósty opisuje proces walidacji proponowanej metody na drodze symulacji komputerowej. Autor wykorzystuje w tym celu sprawdzone narzędzia (biblioteki) CelestLab oraz Aerospace Blockset z pakietu Scilab, które służą głównie do generacji wiarygodnych danych, zgodnych z warunkami, jakie panują na wysokiej orbicie okołoziemskiej (ok. 7000 km), po której porusza się (chwilowo wirtualny) nanosatelite Lithuanica SAT-2. Po dokonaniu kalibracji sensorów Autor przeprowadza testy, również dla przypadków gdzie okres próbkowania jest różny dla wykorzystywanych sensorów. Wyniki są odnoszone do innych, opisywanych w literaturze metod, potwierdzając dobre własności proponowanej metody.

Rozdział siódmy to podsumowanie kończące pracę, wymieniające konkluzje oraz prezentujące plan przyszłych prac. Po nim znajduje się spis literatury, zawierający ponad 100 pozycji oraz załącznik z trzema punktami.

Istotne elementy rozprawy

Doktorant przedstawił wyniki dowodzące głównych tez pracy, czyli że możliwe jest opracowanie metod estymacji orientacji nanosatelite za pomocą tanich sensorów ruchu i innych sensorów wspomagających, pracujących zarówno z tą samą jak i zróżnicowaną częstotliwością próbkowania w warunkach pełnej i ograniczonej dostępności do danych pomiarowych, wynikających z tranzycji satelity poprzez cień Ziemi. Do osiągnięć Autora zaliczam:

- Zaproponowanie koncepcji nowego algorytmu estymacji orientacji nanosatelite o wartościowych cechach. Koncepcja ta wpisuje się w trend polegający na zastosowaniu metod wygładzających przebiegi estymowanej wielkości i korzystających ze schematu predyktor-korektor.
- Przeprowadzenie walidacji metody na drodze symulacji komputerowej, przy zastosowaniu wiarygodnych modeli i danych opisujących przestrzeń kosmiczną na orbicie (ok. 7000 km nad Ziemią) oraz obiekt, czyli nanosatelite Lithuanica SAT-2. Dokonanie oceny wyników w odniesieniu do znanych metod (najczęściej są to liczne odmiany filtru Kalmana).
- Przygotowanie modeli matematycznych obiektu i otoczenia oraz wykorzystanie dopracowanych bibliotek zawierających szablony tych modeli wraz z funkcjami przetwarzającymi te dane.
- Zebranie licznych materiałów pomocniczych, które ułatwiają nawigowanie po prezentowanych zagadnieniach.
- Opracowanie planów implementacji metody dla konkretnego nanosatelite.

Uwagi krytyczne

Ponieważ pierwsze trzy rozdziały mają charakter pomocniczy i są wyczerpujące, uwagi krytyczne odnoszą się do głównej części pracy poświęconej procesowi estymacji orientacji.

1. Przegląd algorytmów estymujących orientację bryły sztywnej w przestrzeni (str. 45 - WP, KFQ, KF) obejmuje kilka grup należących do Filtrów Kalmana oraz iteracyjnych metod poszukiwania minimum zawierających zmienny krok i kierunek poszukiwania. Oprócz wymienionych w pracy metod, ważne odnotowania są: QPFEST (Quaternion Particle Filter Estimator), USQUE (Uncentred Quaternion Estimator), GA-QPF (Genetic Algorithm-Embedded Quaternion Particle Filter) oraz kilka innych (BSEKF,...), wykorzystujących proces wygładzania estymaty. Wszystkie one charakteryzują się niskim błędem estymowanej orientacji.
2. W pracy kompletnie pominięto zagadnienie implementacji proponowanej metody, przez co trudno odnieść się do wyników prezentowanych w tabeli 6.4. i uznać, że proponowany algorytm generuje wyniki z błędem kilkukrotnie mniejszym od wyników otrzymywanych dla wspomnianych w tabeli metod. Z drugiej strony wiadomo, że profesjonalne implementacje filtrów Kalmana wykorzystują np. zapis macierzy $P \rightarrow SS^T$, co poprawia dokładność estymacji prawie o rząd. Wyniki dla wspomnianych wcześniej metod (QPFEST, USQUE, GA-QPF lub KF-ArBB, KF-DAF) są jeszcze lepsze. Nie można jednak porównać wyników uzyskanych dla różnych warunków prowadzenia eksperymentu.
3. Nie wspomniano nic o praktycznych metodach poprawiania dokładności estymacji, np. poprzez zastosowanie macierzy sensorów, tzw. „antena array”. Najczęściej jest to czwórka sensorów umieszczona na skrajnych elementach satelity, np. na panelach fotowoltaicznych.
4. Analiza pomiarowa jest trochę oderwana od rzeczywistości. Autor całkowicie zaniedbuje błędy wynikające z położeniem czujników względem siebie. Nawet mała odległość (ta sama płytką drukowaną) sensorów względem siebie może powiększać końcowy błąd pomiarowy.
5. To samo odnosi się do błędów orientacji zamocowania układu. Odchylenie płaszczyzny jednego układu od płaszczyzny zamocowania pozostałych sensorów wpływa negatywnie na pomiar.
6. Profesjonalna rejestracja danych (strumienia światła) za pomocą kamer uwzględnia zniekształcenia optyczne. Temat ten nie jest sygnalizowany w pracy.
7. Braku sygnału z kamery po wystąpieniu zaćmienia Słońca można czasowo zastąpić obserwacją stałych gwiazd, kosztem skomplikowania analizy obrazu. Czy taka opcja była brana pod uwagę?
8. Istnieje szereg zmodyfikowanych filtrów Kalmana o wysokich parametrach estymacji, np. KF-ArBB (Array Building Blocks) lub KF-DAF (Deterministic Annealing Filter). Należałoby wspomnieć o tych metodach.
9. W pracy brakuje elementarnych testów laboratoryjnych, które przy obecnej dostępności (i atrakcyjnej cenie) podzespołów pomiarowych łatwo jest wykonać nawet w skromnym

laboratorium. Badania doświadczalne stanowiłyby przysłowiowa kropkę nad „i”, pokazując, jakość proponowanej metody.

10. Nie jest prawdą, że zróżnicowane okresy próbkowania dla układów pomiarowych są czymś nowym. Metoda stosowana jest praktycznie od dawna. Również okresowa utrata danych pomiarowych oraz metody obsługi takich sytuacji są dobrze znane.

Uwagi natury redakcyjnej

- o W początkowej części pracy zamieszczono mały, bardzo pomocny słownik, który zawiera ważniejsze łacińskie pojęcia z zakresu astronomii. Jest to bardzo dobry pomysł.
- o Praca jest zredagowana bardzo starannie. Zamieszczone w pracy liczne rysunki, tabele oraz schematy są czytelne, opatrzone właściwymi podpisami, które w wyczerpujący sposób informują o prezentowanych zjawiskach. Zamieszczone wzory wykorzystują indeksowanie górne i dolne oraz prawe i lewe, co może niekiedy utrudniać uważną ich analizę, przykładowo wzór (3.9) ${}^b\mu = -K_d {}^b\dot{B}$. W celu poprawienia czytelności można wprowadzić nawiasy lub dodatkową spację, np. ${}^b\mu = -K_d \cdot {}^b\dot{B}$.
- o Do kilku wykresów (np. 6.21- 6.23) można byłoby dodać lupę w celu pokazania powiększonych fragmentów.
- o Rysunki (np. 6.9, 6.13) odstają od pozostałych pod względem jakości.
- o Autor nie ustrzegł się błędów interpunkcyjnych, w wielu miejscach brakuje przecinków.
- o Sporadycznie brakuje przymków, np. „dla”.
- o Język angielski jest dobrze zrozumiały, ale czasami występują błędy dla liczby mnogiej.
- o Sporo błędów, o których mowa powyżej, występuje w polskim i angielskim streszczeniu:
 - 2 akapit, ostatnie zdanie: powtórzenie spójnika „i”,
 - 4 akapit; „... modeli referencyjnych mierzonych...”, brakuje słowa „dla”,
 - 6 akapit, : „...Monte Carlo nieuwzględniający okresową niedostępność...” , błędna odmiana. „...takie realistyczne badania...” - ?, „... odporny na zjawisko zaćmienia Słońca”. O co chodzi. Czy inne algorytmy działają w warunkach bez zaćmienia?
 - 1 akapit (ang.): „ ... following hypothesis”, liczba mnoga: „ ... following hypotheses”, podobnie na końcu streszczenia
 - 1 akapit, punkt 3 (ang.): „... with a systems”. -> „... with a system”.
 - 2 akapit: “... attitude of spacecraft”. -> “... attitude of a spacecraft”.

Konkluzja

Pomimo wymienionych uwag krytycznych, przedstawioną do oceny rozprawę oceniam bardzo wysoko. Uważam, że praca przekracza ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Pawła Zagórskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Uważam, że rozprawa stanowi istotny wkład w obszarze projektowania nowoczesnych metod estymacji parametrów ruchu, które mogą być wykorzystane również poza obszarem kosmonautyki.

Stwierdzam, że praca p.t. „Nanosatellite attitude estimation” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę o Stopniach i Tytule Naukowym obowiązującą obecnie w Polsce i popieram starania mgr inż. Pawła Zagórskiego o nadanie jemu stopnia doktora w dyscyplinie – *automatyka i robotyka*.



Ryszard Leniowski