

**Recenzja rozprawy doktorskiej pana mgr Wojciecha Adamskiego pt.  
"Sterowanie i projekt sterowca autonomicznego"**

### 1. Problem badawczy i jego znaczenie.

Problem badawczy rozważany przez autora rozprawy został sformułowany w rozdziale 1.2. Problem ten to zaprojektowanie i weryfikacja eksperymentalna algorytmu sterowania dla sterowca z deficytem napędów (brak silników w kierunku poprzecznym ruchu) w obecności różnych zakłóceń. W odróżnieniu od dotychczas istniejących w literaturze przedmiotu rozwiązań zadania śledzenia trajektorii, autor rozprawy przyjął założenie, że błędy położenia i orientacji nie są stabilizowane niezależnie ale jednocześnie.

Takie podejście jest bardziej intuicyjne, a zastosowane w praktyce pozwoliłoby na płynną regulację ruchu sterowca poprzez wpływanie na wszystkie składowe błędy równocześnie, a nie sekwencyjnie.

### 2. Wkład autora.

Zasadnicza oryginalność rozwiązania podanego przez autora polega na zdefiniowaniu tzw. **błędów pomocniczych**. W odróżnieniu od znanych rozwiązań z literatury przedmiotu, gdzie błędy położenia i orientacji są zazwyczaj definiowane niezależnie, autor rozprawy zdefiniował innowacyjny błąd trajektorii, w którym pierwsza składowa jest geometryczną odległością pomiędzy sterowcem a trajektoriąadaną (czyli układem  $X_a Y_a Z_a$ ), natomiast dwie pozostałe składowe błędu łączą w sobie błąd położenia i orientacji w taki sposób, że stanowią one miary niedopasowania do siebie wektorów osi  $X$  i  $Y$  układu lokalnego sterowca oraz układu definiującego trajektorięadaną. Dopasowanie do siebie tych dwóch wspomnianych układów pozwala na uzyskanie śledzenia trajektorii z poprawną orientacją. Jednocześnie należy podkreślić, że błędy pomocnicze mogą być bezpośrednio sterowane, co pozwala na poradzenie sobie z problemem niedosterowania obiektu. Taki był zamysł autora i jest to pomysł poprawny i interesujący.

Należy w tym miejscu podkreślić, że proponowane przez autora błędy pomocnicze przypominają błędy definiowane podczas śledzenia ścieżki w przestrzeni trójwymiarowej z parametryzacją ortogonalną. Zdefiniowane błędy pomocnicze mają wiele wspólnego z taką parametryzacją, zwłaszcza fakt, że problem jest źle zdefiniowany dla wartości błędu równych 0. Z tego powodu wydaje mi się, że w kolejnych latach autor rozprawy mógłby kontynuować badania naukowe, wykorzystując w nich zwłaszcza pojęcie parametryzacji nieortogonalnej do rozwiązania zadania przemieszczania się wzdłuż żądanej krzywej w przestrzeni trójwymiarowej wykorzystując układ Serreta-Freneta. Taka parametryzacja nie jest lokalna i nie wymaga spełnienia warunku, że błąd musi być różny od zera. To pozwoliłoby prawdopodobnie na uzyskanie kolejnych algorytmów sterowania dla sterowca, co autor słusznie zauważył, podając jako kierunek przyszłych badań właśnie wykorzystanie opisu używanego do śledzenia ścieżek.



To, co decyduje o oryginalności przedstawionej rozprawy i odróżnia ją od innych prac z dziedziny sterowania aerostatów to bardzo staranna weryfikacja eksperymentalna. Autor rozprawy stworzył unikatowe stanowisko badawcze składające się z wytworzonego przez siebie niewielkiego sterowca, stacjonarnego komputera prowadzącego obliczenia i przesyłającego sygnały do jednostki centralnej – sterownika pokładowego – poprzez moduł radiowy, a także systemu Motion Capture firmy Optitrack pozwalającego na precyzyjne określenie położenia i orientacji obiektu. Autor przeprowadził szereg eksperymentów, próbując ocenić wpływ wielu czynników na ewentualne praktyczne zastosowanie proponowanego przez siebie algorytmu sterowania. Rozważył on mianowicie wpływ nieprawidłowej estymacji macierzy bezwładności na ruch obiektu, a także wpływ zakłóceń zewnętrznych (pogody, a zwłaszcza wiatru) oraz zakłóceń pomiarowych pochodzących z niedokładności używanych w praktyce czujników. Taka weryfikacja pozwala przypuszczać, że w praktyce zaprojektowany przez autora rozprawy algorytm sterowania zadziała prawidłowo.

Należy podkreślić, że jednostka, w której doktorant prowadził badania naukowe, współpracuje z najlepszym ośrodkiem badawczym nad aerostatami w Europie, tj. z zespołem prof. Yasminy Bestaoui Sebbane z Uniwersytetu d'Evry we Francji.

### 3. Poprawność.

Jeśli chodzi o kwestię poprawności, to należy zwrócić uwagę na jej dwa aspekty, mianowicie **poprawność przyjętego rozwiązania** i **poprawność rozważań** wynikających z założonej metody prowadzonych na gruncie matematycznym przez autora.

**Poprawność rozważań** autora nie budzi zastrzeżeń. Przyjęte założenia są słuszne i mają na celu uzyskanie jak najbardziej odpornego sterowania, co pozwoliłoby na praktyczne zastosowanie go w rzeczywistym obiekcie. Dokonywane przekształcenia są prawidłowe, dobrze przemyślane i stosują aparat matematyczny powszechnie używany w teorii sterowania robotów, do których należą także sterowce.

Odrębną kwestią jest **poprawność przyjętego rozwiązania**. Jak wspomniano wcześniej, autor zdefiniował tzw. błędy pomocnicze, które nie były dotychczas stosowane w zadaniu sterowania ruchem aerostatów. Błędy te są oryginalne i stanowią rozwiązanie pośrednie pomiędzy zwyczajowymi błędami śledzenia trajektorii, a błędami śledzenia ścieżki. Niestety, pomimo swoich zalet, przyjęta definicja błędów jest obciążona pewną wadą strukturalną, a mianowicie nie pozwala ona na osiągnięcie przez nie wartości równej 0. Nie jest to zjawisko nietypowe, gdyż podobna sytuacja ma miejsce np. w przypadku błędów odległości w parametryzacji ortogonalnej Serreta-Freneta podczas śledzenia ścieżki, co powoduje, że taka metoda pozwala jedynie na asymptotyczne zbliżanie się do ścieżki, a nie na jej osiągnięcie. Autor próbował w rozprawie rozważyć konsekwencje przyjętej metody i zapewnić spełnienie koniecznych ograniczeń, co zresztą mu się udało. Z punktu widzenia praktycznej implementacji opracowanego przez autora algorytmu sterowania wady błędów pomocniczych nie są krytyczne, bo w rzeczywistej aplikacji uzyskanie idealnego odtwarzania trajektorii (tzn. z zerowym błędem) jest nierealnym oczekiwaniem.

Jako remedium na ograniczenia przyjętego rozwiązania można w przyszłych badaniach przyjąć inny opis ruchu, a mianowicie śledzenie nie trajektorii, ale ścieżki tj. krzywej geometrycznej w przestrzeni trójwymiarowej. Aby uniknąć ograniczeń na niemożność zerowania się błędów, można użyć parametryzacji nieortogonalnej, która jest globalna, a przez to zawsze dobrze zdefiniowana. Taką parametryzację można znaleźć w literaturze i z powodzeniem wykorzystać.

Z kolei wybór sterowania ślizgowego jako algorytmu regulacji jest jak najbardziej poprawny. Jest to sterowanie znane ze swojej odporności na zakłócenia zarówno strukturalne (np. zakłócenia zewnętrzne – pogodowe), jak i parametryczne (nieprawidłowy dobór parametrów w macierzy bezwładności). Ta część rozważań nie budzi zastrzeżeń i jest jak najbardziej poprawna.



#### 4. Wiedza kandydata.

W rozdziałach 2 i 3 zaprezentowano istniejący stan wiedzy w dziedzinie sterowania pojazdami typu aerostat-sterowiec. Autor bardzo starannie dokonał przeglądu najbardziej znaczących pozycji literaturowych, podsumowując główne założenia badawcze w nich przyjęte oraz sprawdzając, czy autorzy tych publikacji przeprowadzili weryfikację eksperymentalną otrzymanych wyników. Najwięcej uwagi poświęcono tematyce sterowania samych sterowców, jednak autor rozprawy zauważył, zresztą słusznie, podobieństwo rozważanych przez siebie problemów do zagadnień sterowania obiektami pływającymi, zwłaszcza łodziami podwodnymi poruszającymi się w przestrzeni 3D. I tu zabrakło mi odniesienia do prac portugalskich uczonych Lapierre, Saetanto i Pascoala, którzy od lat zajmują się zagadnieniem realizacji ruchu łodzi podwodnych w przestrzeni trójwymiarowej. Warto zapoznać się z pracami wspomnianych autorów, zwłaszcza gdyby doktorant planował kontynuację badań nad sterowaniem aerostatów, gdyż proponują oni alternatywny opis ruchu obiektu nieliniowego, mianowicie śledzenie ścieżki, a nie trajektorii.

Jeżeli natomiast chodzi o inne argumenty potwierdzające posiadanie przez autora rozprawy wiedzy i umiejętności z dziedziny Automatyka i Robotyka, to należą do nich np. analiza stabilności zaprojektowanego algorytmu sterowania, ocena uzyskanej zbieżności błędów (w przypadku tej rozprawy jest to tzw. stabilność praktyczna, czyli zbieżność błędów do małego otoczenia wartości zerowej), przedstawienie zbieżności w skończonym czasie w oparciu o oszacowanie

$$\dot{V} < -\alpha\sqrt{V}$$

oraz biegle posługiwanie się teorią Lapunowa. Autor zdaje sobie sprawę z faktu, że poprawna estymacja macierzy mas jest kluczowa dla syntezy algorytmu sterowania i szuka oszacowań pozwalających uzyskać prawidłową estymację – w przeciwnym przypadku, podobnie jak w adaptacyjnym algorytmie dokładnej linearyzacji należącym do metod obliczanego momentu, algorytm nie będzie działać poprawnie.

To potwierdza tezę, że autor rozumie istotę problemów związanych z syntezą układu sterowania dla obiektu nieliniowego, potrafi ją przeprowadzić i w oparciu o istniejące twierdzenia zbadać właściwości uzyskanego systemu z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego, co jest najważniejsze z punktu widzenia dyscypliny Automatyka i Robotyka.

#### 5. Inne uwagi.

- Bardzo przydatne i podnoszące jasność wyводу okazało się podawanie przy znaku relacji poszczególnych wzorów małego numeru równań, z których ten wzór wynika.
- Praca niezwykle starannie przygotowana pod względem edytorskim i językowym. W całej rozprawie pojawiły się zaledwie 3 literówki. Ponadto duża liczba kolorowych rysunków pozwoliła na znacznie łatwiejszą percepcję pracy.
- Str. 27, uwaga ogólna: nie podano, w jaki sposób jest wybierany punkt na trajektorii, w którym znajduje się układ  $X_d Y_d Z_d$  i w jaki sposób ten układ jest orientowany.
- Str. 27, 3 linia od dołu, definicja wersora  $j_a^g$  układu lokalnego stowarzyszonego ze sterowcem: w pracy napisano "...wersor  $j_a^g$  jest wyznaczany w taki sposób, że jest on równoległy do płaszczyzny  $XY$  układu bazowego...".

Ta definicja nie jest poprawna, gdyż płaszczyzna  $XY$  układu bazowego jest nieruchoma, natomiast układ lokalny sterowca jest ruchomy i nie ma żadnego powodu, dla którego byłby on ortogonalny do wersora  $i_a^g$  pokazanego na rys. 10, a przecież taki warunek musi spełniać układ współrzędnych.



- Str. 28, zdanie powyżej równania (6): tu niezbędny jest komentarz, że w dalszej części pracy autor będzie korzystał z opisu ruchu względem układu lokalnego sterowca, a nie względem układu bazowego, dla którego zdefiniowano wektory we wzorach (3)-(4).
- Str. 31-32, równanie (11) i rys. 11: wydaje się, że zamiar autora był następujący – zamiast określać błędy orientacji jako 3-elementowy wektor, niezależny od błędu odległości, można związać błąd położenia i orientacji poprzez podanie różnic długości pomiędzy dwoma wersorami jednego układu i ich rzutami na odpowiadające wersory drugiego układu. Ponieważ oba układy są prawoskrętne, to dopasowanie dwóch spośród trzech wersorów spowoduje dopasowanie obu układów. Na rys. 11 widać taką zależność dla wersora  $Y_g$  natomiast dla  $X_g$  to nie jest widoczne (nie ma ortogonalności rzutu). Jednak czy taka ortogonalność rzeczywiście jest wymagana?
- Str. 33, równanie (16): cały czas nurtuje mnie niepokój, że taka definicja błędu dla wersora  $j_a^g$  jest problematyczna bo nie zawsze można ją zastosować, np. gdy  $i_a^g$  jest pionowy i jego rzut na  $XY$  jest równy 0 – wtedy nie można jednoznacznie zdefiniować płaszczyzny przechodzącej przez  $i_a^g$  i jego rzut, stąd nie można zdefiniować  $j_a^g$ .
- Str. 35, rys. 14: brakuje informacji o tym, która powierzchnia odpowiada któremu konturowi, np.  $k_\delta = 0.1$  - czerwony.
- Str. 42, równanie (42): czy można mieć pewność, że estymowana macierz bezwładności  $\hat{M}$  jest odwracalna. To jest kluczowe pytanie, zwłaszcza że przeciw kształt obiektu i wypełnienie gazem zmienia się na różnych wysokościach. Jak często należy zmieniać to oszacowanie? Zawsze w takim przypadku istnieje ryzyko, że podczas próby zmieniania nastaw w sposób skokowy mogą się pojawić nagłe sygnały destabilizujące układ. Przykładem takiego działania z parametrami zmienianymi skokowo jest tzw. sterownik niesfalsyfikowany autorstwa Tsao i Safonova. Czy były robione jakieś badania przy założeniu skokowych zmian wartości w estymowanej macierzy bezwładności? Jak rozumiem, eksperyment nie obejmował takich problemów ze względu na wielkość pomieszczenia badawczego, jednak w rzeczywistych warunkach taki problem może się pojawić.
- Str. 46, nierówność (96): jest to wyrażenie, które pozwala sprawdzić, czy jest spełniony warunek wystarczająco dokładnej estymacji macierzy bezwładności. Jednak w tym oszacowaniu występuje funkcja  $\gamma$ , której norma musi być ograniczona. Niestety, aby to było spełnione, to wszystkie składowe w błędzie pomocniczym muszą być jednocześnie niezerowe. Wydaje mi się, że jest to bardzo mocny warunek, gdyż w analizie praktycznej stabilności można zapewnić tylko tyle, że błędy będą mniejsze niż pewna zadana wartość (czyli błąd będzie się znajdował w  $n$ -wymiarowej kuli o dodatnim promieniu), jednak to nie gwarantuje, że żadna składowa błędu nie będzie równa 0.  
Patrząc na wykresy błędów uzyskane w trakcie eksperymentów, można zaobserwować częste przejścia sygnałów z wartości dodatnich na ujemne. Jest to wspomniany przez autora rozprawy tzw. *chattering*. To sugeruje, że błędy były niekiedy dowolnie bliskie zeru. Jak autor poradził sobie z tym problemem i czy wówczas sygnały sterujące były “obcinane” przez fizyczne ograniczenia wartości sygnałów uzyskiwanych w sterownikach?
- Rysunek 18 i dalsze, w których przebiegi błędów  $\log |^y e_g|$  i  $\log |^z e_g|$  są przedstawione na skali logarytmicznej w zakresie od  $10^{-10}$  do  $10^{10}$ . Taka skala nie niesie praktycznie żadnej informacji i nie daje wyobrażenia o tym, co się dzieje i jak błędy spadają do zera.
- W symulacjach położenie początkowe dane wzorem (143) nie ma podanych jednostek.
- Str. 60, symulacja II: nie wiadomo, na czym polega błędna estymacja mas. Czy do obiektu o masie wzorcowej zastosowano sterowanie z estymowaną macierzą mas?

## 6. Podsumowanie.

Biorąc pod uwagę opinie zaprezentowane w poprzednich punktach i wymagania zdefiniowane przez artykuł 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym (z późniejszymi zmianami) 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?

Raczej TAK.

Alicja Masur