

Wpłynęło dnia 6.08.2024

Zarejestrowano pod nr 510-9-6/B

Prof. Leszek Trybus

Katedra Informatyki i Automatyki

Politechnika Rzeszowska

Podpis dm

Rzeszów, 29.07.2024 r.

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Dawida Knapika
pt. *Algorytmy sterowania zespołem robotów mobilnych i ich implementacja*

Niniejsza recenzja została sporządzona na prośbę Pana dr hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne AGH w Krakowie.

1. Zakres, cel i tezy

Rozprawa dotyczy rozproszonych algorytmów sterowania zespołem współpracujących robotów mobilnych oraz ich rzeczywistych implementacji. Przez rozproszone algorytmy rozumie się wykorzystanie przez każdy robot w swym sterowaniu jedynie informacji o wzajemnych odległościach do sąsiadów, co jednocześnie oznacza brak centralnej jednostki sterującej, która dysponowałaby informacjami o położeniach robotów. Biologicznymi przykładami takich zachowań są klucze ptaków, stada zwierząt itp. Już w 1987 r. dowiedziono, że zespół autonomicznych mobilnych obiektów jest w stanie wykonać globalne zadanie bazując wyłącznie na lokalnych obserwacjach i zasadach, czyli faktycznie stosując sterowanie rozproszone. Jego zaletą jest ponadto skalowalność, a więc prosta zmiana liczności zespołu, łatwa likwidacja skutków awarii poprzez usunięcie uszkodzonych obiektów, a ponadto możliwość zastosowania powtarzalnych standaryzowanych komponentów. Dlatego główny cel rozprawy doktorskiej mgr inż. Dawida Knapika jakim jest opracowanie algorytmów sterowania rozproszonego zespołem autonomicznych robotów mobilnych zweryfikowanych rzeczywistymi implementacjami, uważam za jak najbardziej właściwy, zarówno pod względem metodologicznym jak i technicznym. Pierwsza z dwóch przedstawionych implementacji miała miejsce w zdalnie udostępnianym amerykańskim Robotarium.

Podstawę drugiej implementacji stanowi niestabilny robot mobilny, którego zbudowanie i przystosowanie do działania w zespole jest dodatkowym celem rozprawy. Jako przykład ilustrujący skalę trudności może służyć niestabilny robot PUMA, którego ramię jest zamontowane wprost na dwukołowej ramie bez trzeciej podpory. Jego istotną zaletą jest zwrotność potrzebna np. w ciasnych magazynach, co jednak wymaga nieprzerwanego manewrowania obydwoma kołami, aby utrzymać pionową postawę robota. Dlatego drugi cel rozprawy doktorskiej mgr D. Knapika, czyli opracowanie niestabilnego robota mobilnego zdolnego do sterowania rozproszonego z przeznaczeniem do laboratorium, uważam również za jak najbardziej właściwy, szczególnie pod względem technicznym. Jego prace w tym zakresie wspierał grant NCBIR INNOTECH, a sam niestabilny robot mobilny ma znaleźć się wkrótce w ofercie krakowskiej formy Inteco.

2. Przegląd treści

Oprócz wstępu (rozdz. 1), podsumowania (rozdz. 6) i rozdziału 2, w którym przytoczono podstawowe pojęcia z zakresu równań różniczkowych, stabilności Lapunowa, regulatora LQR i grafów opisujących formacje robotów, trzy zasadnicze rozdziały rozprawy przedstawiają algorytmy rozproszonego sterowania lokalnego w odniesieniu do:

- 3) formacji z robotami traktowanymi jako punkty kinematyczne,
- 4) zespołu rzeczywistych robotów klasy (2,0) udostępnianych zdalnie w amerykańskim Robotarium,
- 5) niestabilnego robota mobilnego realizującego sekwencyjnie zadania poszczególnych robotów w formacji.

W rozdziale 3 rozpatrywane są dwa podstawowe zadania występujące w problemach tworzenia i utrzymania formacji, tzn.: 1) osiągnięcie i zachowanie stałej odległości między dwoma robotami, 2) cykliczna pogoń, czyli trójkątna formacja, w której dany robot śledzi położenie kolejnego sąsiada (być może uciekającego). Sterowanie każdego z robotów traktowanych jako punkty kinematyczne jest proporcjonalne do uchybu odległości będącego różnicą kwadratów pomiędzy odległościąadaną, a jej faktyczną wartością. W odniesieniu do pierwszego zadania pokazano, że układ zamknięty z takimi sterowaniami jest asymptotycznie stabilny. W przypadku cyklicznej pogoni powtórzono literaturowy dowód wykładniczej stabilności uzupełniony wymaganiami, aby początkowe pozycje robotów nie były współliniowe. Cykliczną pogoń poszerzono następnie na przypadek, gdy lokalne układy współrzędnych robotów mają jednakową orientację (np. kompas) i chodzi o utrzymanie całej formacji zgodnie z tą orientacją. Wyniki symulacyjne pokazują trajektorie robotów na płaszczyźnie XY oraz czasowe przebiegi położenia.

Rozdział 4 dotyczy sterowania zespołem nieholonomicznych robotów klasy (2,0) korzystając zdalnie z Robotarium w Georgia Institute of Technology. Na obszernej platformie znajduje się tam 20 niewielkich robotów GRITSBot obserwowanych przez 8 kamer i sterowanych przez dedykowany serwer. GRITSBot ma dwa niezależnie napędzane koła jezdne oraz trzecie koło samonastawne będące podporą (klasa (2,0)). Sygnałami sterującymi są prędkości ruchu postępowego i obrotowego, które za pomocą odpowiedniej transformacji określają położenie XY i orientację (obróć) robota. Odwrotna transformacja pozwala wyznaczyć sterowania na podstawie odchyłek położenia i orientacji. Robotarium udostępnia również środowisko symulacyjne celem wstępnej weryfikacji algorytmów. Przebiegi rzeczywistych eksperymentów można rejestrować w YouTube.

W sumie Autor przeprowadził w Robotarium pięć eksperymentów symulacyjnych i rzeczywistych, z których dwa pierwsze dotyczyły zadań z poprzedniego rozdziału (odległość, cykliczna pogoń), w dwu następnych chodzi o śledzenie lidera formacji trójrobotowej, a w ostatnim o utworzenie pięciokąta foremego. Lider formacji trójrobotowej może być nieruchomy, albo poruszać się wzdłuż prostej z prędkością będącą sygnałem trapezoidalnym (rozpędzanie, hamowanie), przy czym zadane odległości między robotami zależą od tej prędkości. Sterowania robotów śledzących lidera są proporcjonalne nie tylko do odchyłki odległości, ale również do prędkości. Oprócz trajektorii XY i przebiegów położenia podano również migawki z rejestracji YouTube.

W rozdziale 5, najobszerniejszym, zastosowano przedstawione algorytmy do sterowania zespołem robotów niestabilnych wykorzystując oryginalny robot skonstruowany przez Autora. Robot ma postać ramy z dwoma niezależnie napędzanymi kołami, do której przymocowano pionowy pręt z przeciwwagą. Przypomina to odwrócone wahadło czyniąc robot niestabilnym w pozycji pionowej. Czujniki mierzą położenia kół, pochylenie robota i ich prędkości (enkodery, IMU z akcelerometrem i żyroskopem). Sterowanie silnikami DC jest realizowane w trybie PWM. Sterownik z kartą RT-DAC/Zynq zintegrowano ze środowiskiem MATLAB/Simulink za pośrednictwem WiFi. Pozwala to projektować układ sterowania w oparciu o model matematyczny obiektu, czyli metodologią MBD (*Model Based Design*).

Do konstrukcji modelu matematycznego zastosowano metodę Eulera-Lagrange'a wyrażając energię kinetyczną robota jako sumę energii w ruchu postępowym i obrotowym. Na finalny model składają się trzy równania drugiego rzędu (przyspieszenia) określające pochylenie robota, średni kąt kół i orientację w zależności od prędkości obrotowych dwóch silników. Model ma kilkanaście parametrów, z których część zmierzono bezpośrednio, część odczytano z not katalogowych, a dwa zidentyfikowano na podstawie nieskomplikowanych eksperymentów (podparcie w środku ciężkości, moment bezwładności z okresu wahań). Weryfikacja modelu w środowisku MATLAB/Simulink wykazała zachowanie zgodne z przewidywaniami. Linearyzując model dokoła górnego punktu równowagi otrzymano układ sześciu równań z dwoma sterowaniami.

Warunkiem zastosowania regulatora od stanu okazało się uzyskanie rzetelnej informacji o pochyleniu robota i prędkości jego zmiany, pomimo wysokiego poziomu szumu akcelerometru i dryfu żyroskopu. Estymaty pochylenia i jego prędkości uzyskano za pomocą 2-wymiarowego dyskretnego filtra Kalmana integrującego akcelerometr i żyroskop. Utrzymanie pionowej postawy oraz śledzenie referencyjnych sygnałów położenia kół i orientacji zrealizowano za pomocą liniowo-kwadratowego regulatora LQR. Celem uniknięcia błędów ustalonych do modelu dodano całki z odchyłeń kątów średniego położenia kół i orientacji, przez co model stał się 8-wymiarowy. Pewną poprawę jakości sterowania uzyskano normalizując wektor kierunku ruchu w sterowaniu każdego robota w formacji.

Przebiegi symulacyjne dla nieliniowego modelu robota i zadania stabilizacji pokazały, że wstępnie wychylony robot zbiega do punktu równowagi. Natomiast robot rzeczywisty nieznacznie oscyluje w pobliżu tego punktu (2...3 stopnie) aktywnie korygując swoją pozycję celem utrzymania pionowej postawy. Pokazano również zachowanie robota rzeczywistego w przypadku nadążania za referencyjnymi sygnałami prędkości liniowej i kątowej zwracając jednocześnie uwagę, że likwidację pewnych odstępstw trajektorii XY od zadanej umożliwi dopiero algorytm uwzględniający położenie w formacji.

Na cały algorytm sterowania robota składają się dwie pętle sprzężenia zwrotnego realizowane przez opracowany sterownik, tzn. wewnętrzną i zewnętrzną. Pętla wewnętrzna z regulatorem LQR zapewnia utrzymanie pionowej postawy i śledzenie sygnałów referencyjnych, natomiast pętla zewnętrzna realizuje sterowanie formacją. Pomiedzy pętlami pośredniczy wspomniana transformacja przekształcająca sterowanie wyznaczone dla punktów kinematycznych na kinematykę robota nieholonomicznego. Badania symulacyjne zespołu robotów niestabilnych wykonano dla wszystkich opisanych poprzednio zadań, łącznie z poruszającym się liderem formacji, w której odległości zależą od prędkości.

Ze względu na dostępność tylko jednego fizycznego niestabilnego robota eksperymenty praktyczne musiały zostać ograniczone do sekwencyjnego wykonywania zadania stojącego przed każdym z robotów, zamiast jednoczesnego wykonywania zadań przez wszystkie roboty, gdyby faktycznie były one dostępne. Autor zrealizował to następująco. Najpierw fizyczny robot 1 będący liderem wykonuje swoje zadanie, a przebieg jego położenia jest rejestrowany jako $\log 1$. Następnie robotem fizycznym staje się robot 2 śledzący $\log 1$, czyli niejako podążający za liderem z zadaną odległością. Jego położenie jest rejestrowane jako $\log 2$. Z kolei robot fizyczny staje się robotem 3 i na podstawie $\log 1$ i 2 podąża za liderem utrzymując formację trójkąta. Według takiego scenariusza pokazano tworzenie formacji dla lidera nieruchomego oraz utrzymywanie jej, gdy lider porusza się wzdłuż prostej. Pomimo lekko oscylacyjnego charakteru ruchu robota algorytm sterowania formacją pozwala zbliżyć uchyby odległości do wartości bliskich zeru.

Rozprawę kończą trzy załączniki, z których A, B zawierają skrypty Matlab dla przykładów z rozdziału 3, a w C znajdują się odnośniki YouTube do nagrań i wizualizacji z przeprowadzonych eksperymentów.

3. Ocena ogólna

Pierwszym z dwóch zasadniczych rezultatów rozprawy jest opracowanie i implementacja rozproszonych algorytmów sterowania zespołem – formacją współpracujących robotów mobilnych. Sterowania robotów bazują jedynie na wzajemnych odległościach, ponieważ globalny układ współrzędnych jest nieznany. Dzięki takiej współpracy formacja jest w stanie wykonać postawione przed nią globalne zadanie.

Weryfikacji zaproponowanych algorytmów dokonano zarówno poprzez symulacje komputerowe jak i na rzeczywistych stanowiskach z robotami mobilnymi. Pierwszym z nich było zdalnie dostępne Robotarium z nieholonomicznymi robotami klasy (2,0), a drugim stanowisko z niestabilnym robotem mobilnym konstrukcji Autora. Szereg eksperymentów, w tym śledzenie poruszającego się lidera formacji z odległościami zależnymi od prędkości potwierdziło poprawność algorytmów.

Opracowanie niestabilnego robota mobilnego jest drugim zasadniczym rezultatem rozprawy, pomimo że Autor nazywa go pomocniczym. Robot niestabilny przypomina odwrócone wahadło umieszczone na dwukołowym wózku bez podpory. Opracowano jego model matematyczny, który po linearyzacji i dołączeniu całkowania poprawiającego dokładność zawiera 8 zmiennych stanu i 2 sterowania. Sterowanie prowadzi układ kaskadowy z wewnętrznym regulatorem LQR odpowiadającym za utrzymanie pionowej postawy i śledzenie sygnałów referencyjnych otrzymywanych z regulatora zewnętrznego realizującego sterowanie formacją. Obliczenia wykonuje dwurdzeniowy układ Xilinx Zynq z jednym rdzeniem obsługującym pętlę wewnętrzną przez system FreeRTOS, a drugim pętlę zewnętrzną przez system Linux. Szumy akcelerometru i dryf żyroskopu udało się pokonać dzięki filtrowi Kalmana. Na tak zaawansowany wielofunkcyjny sterownik należy spojrzeć ze szczególnym uznaniem.

Eksperymenty prowadzone były bardzo solidnie. Trajektorie XY, przebiegi położenia robotów, a także wizualizacje dostępne w YouTube wyczerpująco uzasadniają poprawność algorytmów. Z uznaniem należy odnieść się do pomysłu logowania przebiegów, co pozwoliło wykorzystać jeden fizyczny robot niestabilny do sekwencyjnego wykonywania zadań stojących przed poszczególnymi robotami w przemieszczającej się formacji.

W sumie lista rozwiązań metodologicznych i sprzętowych przedstawionych w rozprawie obejmuje:

- algorytmy sterowania rozproszonego formacją robotów mobilnych bazujące jedynie na wzajemnych odległościach,
- śledzenie ruchu lidera formacji z odległościami między robotami zależnymi od prędkości,
- dowód asymptotycznej stabilności zamkniętego układu sterowania dla formacji dwu- i trójrobotowej,
- model matematyczny dwukołowego niestabilnego robota z układem sterowania utrzymującym pionową postawę,
- skonstruowanie niestabilnego robota mobilnego z zaawansowanym układem sterowania zintegrowanym w platformę sprzętowo-programową MATLAB/Simulink.

Robot ten jako Unstable Transporter ma znaleźć się niebawem w ofercie firmy Inteco.

Z powyższego widać, że rozprawa doktorska mgr. inż. Dawida Knapika, której pracowitość wyraźnie przekracza typowe doktoraty, faktycznie zasługuje na wysoką

ocenę. Postępując rzetelną, przemyślaną drogą osiągnął on postawione cele jakimi było opracowanie rozproszonych algorytmów sterowania formacją robotów mobilnych z weryfikacją eksperymentalną oraz skonstruowanie dwukołowego niestabilnego robota z zaawansowanym układem sterowania będącym szczególnym wyzwaniem inżynierskim.

4. Uwagi

Podane niżej uwagi dotyczące pewnych uzupełnień poprawiających odbiór rozprawy mają znaczenie drugorzędne i nie umniejszają jej wysokiej wartości.

- Piszac o systemach wieloagentowych (s. 10) można było wspomnieć o pracach zespołu prof. C. Zielińskiego z PW.
- We wzorach (4.11) określających sterowania robotów GRITSbot podczas śledzenia lidera występują parametry k_p , k_v . Brak jednak informacji jak je dobierano.
- Dla zorientowania w dynamice robota niestabilnego można było podać wartości własne macierzy A_1 , A_2 wchodzących w skład macierzy stanu A .
- Brak informacji o zasadach doboru macierzy Q , R w funkcjonale jakości (5.91). Jak się mają wartości własne układu zamkniętego (bieguny) do wartości własnych macierzy A ?
- Ile zadań wykonuje system FreeRTOS, a ile Linux. Jakie są ich funkcje?
- Oprócz niewielkiego zdjęcia skonstruowanego robota wewnątrz diagramu Simulinka (rys. 5.7) dobrze byłoby zamieścić również zdjęcie pełnowymiarowe.

Rozprawa jest stosunkowo obszerna (152 strony) i pod względem formalnym nie budzi żadnych zastrzeżeń. Język opisów tekstowych, rysunki i migawki zdjęciowe są bez zarzutu. Usterki edytorskie dostrzegłem jedynie na stronach 7, 15, 31, 69, 101, 123. Ponadto: w załączniku A, a nie 6.2 na s. 29; definicja 2.19 a nie 2.24 na s. 41; dryf a nie dryft (ang.) na s. 89; pozycja końcowa a nie kątowa na s. 92. Również lepiej byłoby symbol pozycji końcowej na trajektorii XY nazywać rombem, a nie (zanglicyzowanym) diamentem (np. s. 109).

5. Wniosek końcowy

Uważam, że cele postawione w rozprawie zostały osiągnięte. Autor opracował algorytmy sterowania rozproszonego dla zespołu robotów mobilnych, którego zadaniem jest osiągnięcie i utrzymanie zadanej formacji zdefiniowanej przez wzajemne odległości między robotami. Pierwszą weryfikację algorytmów przeprowadził w zdalnie udostępnionym Robotarium. Podstawę drugiej weryfikacji stanowił skonstruowany przez niego niestabilny robot mobilny z układem sterowania wysokiej klasy. Uzyskane wyniki pokazują, że możliwe jest opracowanie rozproszonych algorytmów sterowania zespołem współpracujących autonomicznych robotów mobilnych o złożonej kinematyce i dynamice.

Wobec tego uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Dawida Knapika pt. *Algorytmy sterowania zespołem robotów mobilnych i ich implementacja*, której tematyka mieści się w dyscyplinie *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*, w pełni spełnia wymagania stawiane w Ustawie *Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce* z dn. 20.07.2018 r. i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Janek Tytus

