



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH
DYSCYPLINA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA
I TECHNOLOGIE KOSMICZNE

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Algorytmy sterowania zespołem robotów mobilnych i ich implementacja

Dawid Knapik

Promotor rozprawy: **prof. dr hab. inż. Andrzej Turnau**

Praca wykonana:
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej,
Katedra Automatyki i Robotyki

Kraków, 2024

1 Streszczenie

Tematem pracy są rozproszone algorytmy sterowania dla zespołu współpracujących robotów mobilnych. Rozważane przypadki dotyczą sytuacji, w której roboty nie mają dostępu do globalnego układu współrzędnych, a ich pomiary i sterowanie mają charakter lokalny.

W pracy przeprowadzono analizę sterowania bazującego na wirtualnych potencjałach pomiędzy sąsiadującymi robotami. Zdefiniowano algorytmy sterowania dla zespołu pojazdów mobilnych wykonujących różne zadania, takie jak osiągnięcie formacji czy podążanie za liderem. Opis poszczególnych zadań został scharakteryzowany przez grafy definiujące sposób wymiany informacji pomiędzy robotami. W celu weryfikacji algorytmów przeprowadzono analizę stabilności układu zamkniętego oraz wykonano eksperymenty symulacyjne dla obiektów o uproszczonej dynamice (punkty kinematyczne).

W pracy zaproponowano i opisano adaptację proponowanych algorytmów dla robotów o złożonej kinematyce i dynamice. Wykorzystano w tym celu lokalne pętle sterowania oparte na regulatorach od stanu oraz przekształcenie sterowania obliczonego dla punktów kinematycznych na kinematykę nieholonomicznych pojazdów. Przedstawiono wyniki eksperymentalne i symulacyjne dla różnych typów robotów mobilnych w tym dla niestabilnych pojazdów dwukołowych. Opisano metodologię projektowania układu sterowania bazującą na modelowaniu matematycznym. Zawarto model niestabilnego pojazdu dwukołowego oraz przeprowadzono identyfikację jego parametrów fizycznych. Praca zawiera również opis platformy programowo-sprzętowej, która umożliwiła prowadzenie badań eksperymentalnych.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że możliwe jest opracowanie rozproszonych algorytmów sterowania dla zespołu współpracujących robotów o złożonej kinematyce i dynamice (np. nieholonomiczne, niestabilne roboty mobilne). Praca wskazuje również na możliwe dalsze kierunki badań oraz charakteryzuje potencjalne zastosowania opracowanych algorytmów.

2 Motywacja i cel pracy

Rozproszone algorytmy sterowania zespołem współpracujących ze sobą robotów mobilnych stanowią główny temat badawczy dysertacji. Robotami steruje się lokalnie i mierzy się ich lokalne położenia, bez dostępu do globalnego układu współrzędnych, a więc bez użycia centralnej jednostki sterującej. W istocie bada się możliwości sterowania grupą robotów, a więc formacją, którą tworzy się, a następnie steruje jej ruchem budując różnorodne algorytmy sterowania. Ruch formacji jest badany zarówno symulacyjnie, jak i praktycznie, na rzeczywistych robotach mobilnych sterowanych w czasie rzeczywistym. Typowe zadania obejmują osiągnięcie formacji i jej sterowanie, przy jednoczesnym podążaniu za liderem oraz unikanie przeszkód.

Rozproszone sterowanie formacją robotów posiada unikalne właściwości, a mianowicie: skalowalność, odporność na awarie, zdolność do realizacji złożonych zadań przez użycie prostych, autonomicznych jednostek. W pracy analizowano sterowanie oparte na wirtualnych potencjałach między sąsiadującymi robotami oraz zastosowano teorię grafów do opisu wymiany informacji między jednostkami.

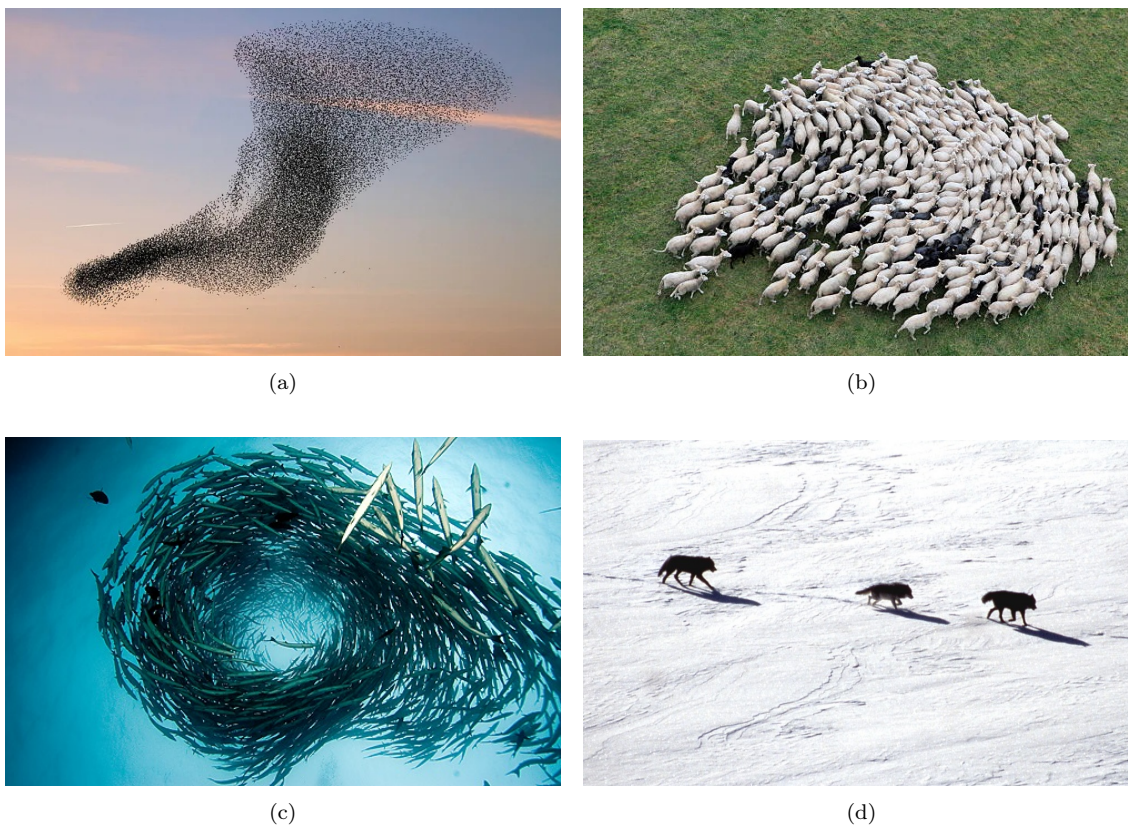
Rozproszone sterowanie, w przeciwieństwie do centralnego sterowania, zakłada brak nadrzędnej jednostki wydającej polecenia podrzędnym wykonawcom, a osiągnięcie wspólnego celu jest realizowane we współpracy. Inspiracją takiego zachowania są systemy biologiczne, np. wspólny ruch klucza ptaków, ławicy ryb czy stada zwierząt (rysunek 2.1).

W 1987 roku, w pracy [13] został zaprezentowany model komputerowy symulujący zachowanie stadne powszechnie znany pod nazwą Boids. Praca ta pokazała, że bardzo proste, stosowane lokalnie zasady pozwalają uzyskać skomplikowane zachowanie stadne. W modelu Reynoldsa występują wyłącznie trzy reguły:

1. unikanie kolizji,
2. wyrównanie prędkości i kierunku ruchu,
3. dążenie do pozostania w środku grupy.

Każda z nich jest stosowana tylko do ograniczonego sąsiedztwa, ponieważ percepcja „boidów” jest wyłącznie lokalna. Model ten pokazał, że zespół mobilnych obiektów może osiągnąć globalne zadanie bazując wyłącznie na lokalnych obserwacjach i zasadach.

W 1995 roku została opublikowana praca [16], w której opisano model „cząstek”, którym nadana jest stała prędkość i losowy kierunek ruchu. Vicsek i in. wykazali, że prosta reguła, która uśrednia kierunek ruchu na podstawie obserwacji lokalnego



Rysunek 2.1: Przykłady kolektywnego zachowania w świecie zwierząt a: chmara ptaków (autor: Gregory Hunt, źródło: <https://www.flickr.com/photos/eosgreg/6965121429/>), b: stado owiec (autor: Dariusz Paciorek, źródło: <https://www.istockphoto.com/pl/zdjęcie/gm155150469-18487497>), c: ławica ryb (autor: Robin Hughes, CC), d: wataha wilków (źródło: Park Narodowy Yellowstone, domena publiczna)

sąsiedztwa prowadzi do synchronizacji ruchu całej grupy pomimo występowania zakłóceń.

Problemem, będącym istotą pracy, jest zadanie sterowania formacją robotów (ang. *formation control*) [2, 1, 7]. Zadanie to polega na koordynacji ruchu robotów w taki sposób, aby osiągnęły one zadane, wzajemne położenie (np. reprezentowane przez figurę geometryczną) korzystając z lokalnych informacji, np. pomiaru położenia sąsiada.

W pracy analizowane są algorytmy sterowania bazujące na odległości pomiędzy robotami (ang. *distance-based*). Metody te zakładają istnienie lokalnych układów współrzędnych, które są niezależne od globalnego układu współrzędnych.

Celem sterowania jest osiągnięcie zdefiniowanych odległości pomiędzy robotami na podstawie lokalnie mierzonych odległości do swoich sąsiadów w swoich lokalnych układach współrzędnych. Notacja globalnego układu współrzędnych może być pomocna w analizie sterowania, ale informacja o jego istnieniu jest niedostępna dla poszczególnych robotów. Wartości odległości mogą zostać zmierzone przez robota za pomocą czujników, takich jak radar, lidar czy sonar.

Algorytmy sterowania w tej kategorii wymagają strukturalnej sztywności grafu,

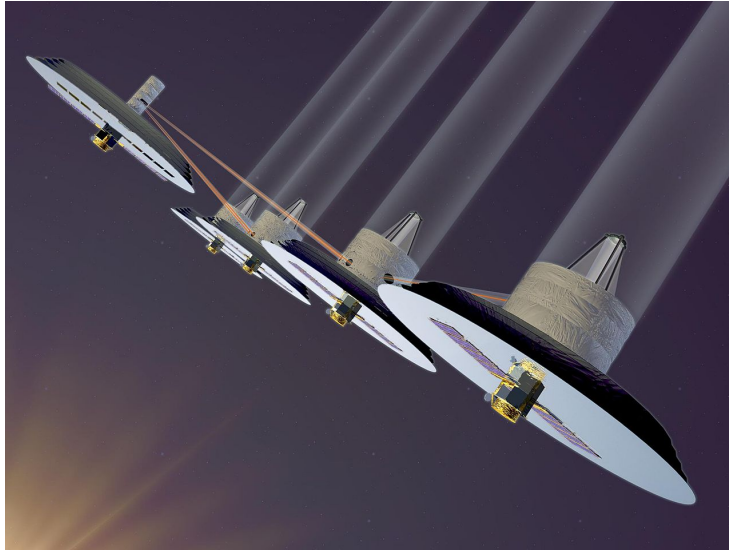
a sterowania są w postaci gradientu odległości [11, 5].

W związku z odległością pomiędzy robotami, będącą nieliniową funkcją, sterowanie jest nieliniowe nawet, gdy poszczególne roboty są opisane przez liniowe równania różniczkowe. Analiza właściwości, w szczególności określenie stabilności, formacji robotów mobilnych stanowi duże wyzwanie. Do najpopularniejszych metod używanych w analizie ww. układów należą funkcjonały Lapunowa.

Istotną motywacją prowadzonych badań są potencjalne zastosowania sterowania rozproszonego opartego na wzajemnych odległościach, do których można zaliczyć:

- Formacje satelitarne (ang. *satellite formation flight*) to zespół złożony z więcej niż jednego satelity, w którym ich stan (np. orientacja) jest sprzężony za pomocą wspólnego algorytmu sterującego [14]. Koncepcje zastosowania formacji satelitarnych rozważane są od lat 70. ze względu na związane z tym zalety. Przykładem może być projekt Terrestrial Planet Finder składający się z zespołu satelitów używających interferometrii do poszukiwania pozasłonecznych planet [8, 6, s. 6]. Koncepcyjna grafika tego projektu została przedstawiona na rysunku 2.2. Rozproszenie czujników pomiarowych na znaczne odległości i ich precyzyjne pozycjonowanie pozwala uzyskać zdolności pomiarowe przekraczające możliwości pojedynczych sensorów (interferometria wielkobazowa, ang. *Very Long Baseline Interferometry*).

Koszt wysłania wielu małych satelitów może być mniejszy niż wysłanie jednego dużego satelity, a potencjalne zyski są znaczne [12, 18]. Jednak centralne sterowanie formacją rodzi wyzwania wynikające np. z opóźnień czasowych podczas komunikacji. Potencjalne zastosowanie rozproszonych metod bazujących na lokalnej wymianie informacji otwiera nowe możliwości w tej dziedzinie [14].



Rysunek 2.2: Wizja satelitarnego systemu interferometrii - projekt Terrestrial Planet Finder (źródło: [NASA], domena publiczna)

- Loty formacyjne (ang. *formation flight*) to rodzaj lotu, gdzie dwie lub więcej maszyn, takich jak samoloty, drony czy inne pojazdy latające, poruszają się razem, utrzymując ściśle określoną konfigurację w przestrzeni. Tego typu loty mogą być wykorzystywane zarówno w celach militarnych, jak i cywilnych.

W związku z rosnącą ilością bezzałogowych statków powietrznych (ang. *unmanned aerial vehicle*, UAV), implementacja algorytmów sterowania rozproszonego stanowi obszar aktywnych badań (np. [3]). Ważne zastosowania cywilne dotyczą monitorowania obszarów (wykrywanie obiektów/zagrożeń, misje poszukiwawczo-ratownicze, badania zanieczyszczeń, tworzenie map) [8, 20]. Osobną gałąź stanowią zastosowania wojskowe. W obydwu przypadkach metody sterowania oparte na wzajemnych odległościach pomiędzy robotami i lokalne sterowanie, stanowią ważne zastosowanie w przypadku braku zewnętrznego źródła informacji o położeniu, np. gdy sygnał nawigacji satelitarnej ulega zakłóceniom.

2.1 Cele pracy

Celem głównym pracy jest skonstruowanie algorytmów sterowania rozproszonego dla układów zbudowanych z wielu autonomicznych robotów mobilnych. Zadaniem zespołu robotów jest osiągnięcie zdefiniowanej formacji wyrażonej przez wzajemne odległości pomiędzy robotami.

Celem podrzędnym pracy jest budowa środowiska sprzętowo – programowego umożliwiającego testowanie algorytmów sterowania dla robotów mobilnych.

2.2 Układ pracy

Praca składa się z sześciu rozdziałów i trzech dodatków. W rozdziale 2 przedstawiono zbiór definicji, które są wykorzystywane do opisu zespołu robotów, analizy ich zachowania i konstrukcji algorytmów sterujących. W rozdziale 3 zostały przedstawione przykłady wprowadzające, które służą jako punkt wyjścia do dalszych rozważań. W rozdziale 4 przedstawiono analizę wybranych algorytmów sterujących grupą robotów nieholonomicznych. W rozdziale tym zamieszczono również wyniki symulacyjne i eksperymentalne przedstawiające działanie proponowanych algorytmów. W rozdziale 5 przedstawiono platformę składającą się z niestabilnego robota mobilnego służącego do transportu i rozwiązań programowo – sprzętowych umożliwiających jego programowanie i sterowanie. Następnie przedstawiono wyniki symulacyjne i eksperymentalne dotyczące implementacji algorytmów dla opisywanego robota. Rozdział 6 stanowi podsumowanie pracy. Zawarto w nim omówienie otrzymanych wyników na tle innych prac. Ponadto przeanalizowano osiągnięte cele i nakreślono możliwe przyszłe kierunki badań. W dodatkach A i B przedstawiono implementacje algorytmów opisanych w przykładach zawartych w rozdziale 3. W dodatku C zamieszczono odnośniki do nagrań i wizualizacji z przeprowadzonych eksperymentów.

3 Najważniejsze wyniki przeprowadzonych badań

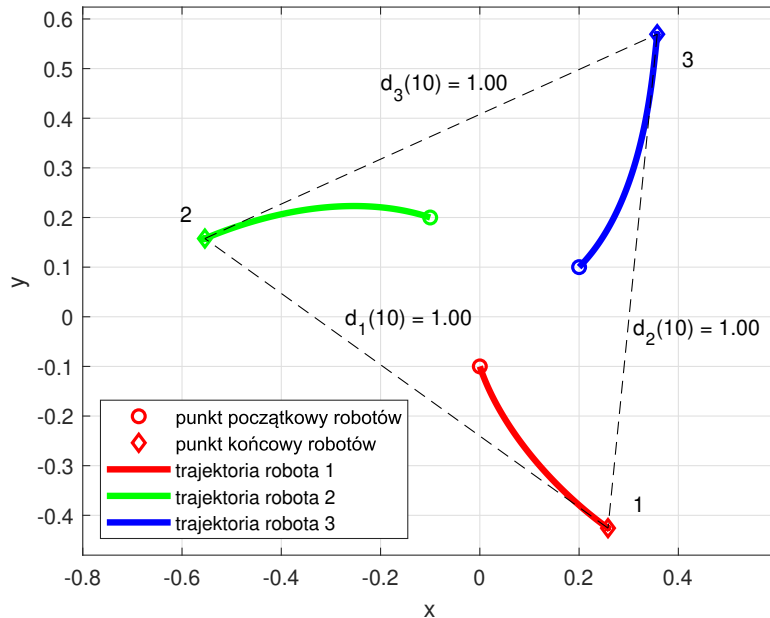
3.1 Analiza stabilności dla uproszczonego modelu

W pracy przedstawiono analizę stabilności dla układu składającego się z dwóch oraz trzech robotów reprezentowanych przez punkty o uproszczonej dynamice.

W obu przypadkach dowiedziono, że lokalne sterowanie bazujące na informacjach o sąsiadujących robotach w lokalnych układach współrzędnych nieposiadających jednakowej orientacji umożliwia osiągnięcie i utrzymanie formacji. W przypadku trzech robotów wykazano, że dowolne początkowe położenie robotów poza położeniem współliniowym gwarantuje zbieżność do zadanych odległości czyli osiągnięcie zadanej formacji. Dowód formalny został przeprowadzony z wykorzystaniem II metody Lapunowa. Ponadto wykazano, że układ jest wykładniczo asymptotycznie stabilny w pewnym otoczeniu punktów równowagi.

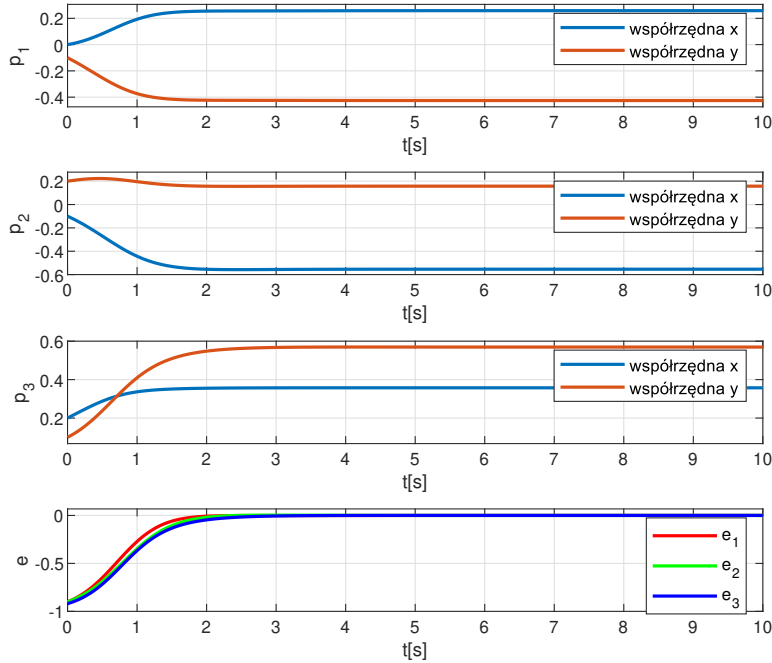
Przykładowe wyniki dla sytuacji, w której początkowe uchyby odległości są mniejsze niż zadane przedstawiono na rysunkach 3.1 oraz 3.2.

Zadaniem pojazdów jest osiągnięcie formacji trójkąta równobocznego o boku równym 1.



Rysunek 3.1: Ruch robotów zaznaczony na płaszczyźnie XY

Początkowa pozycja pojazdów została oznaczona okręgami a końcowa znakiem rombu. Kolor trajektorii odpowiada poszczególnym robotom (odpowiednio czerwony, zielony, niebieski). Kształt trajektorii tworzą łuki wynikające z definicji zadania - cyklicznej pogoni.



Rysunek 3.2: Przebieg położenia oraz uchyb odległości robotów 1, 2 i 3

Przedstawione ilustracje obrazują zachowanie pojazdów w sytuacji gdy ich początkowa odległość jest mniejsza niż zadana. Zgodnie z oczekiwaniem roboty osiągną zadaną formację trójkąta równobocznego o boku 1. Każdy z pojazdów osiąga stałe położenie, a uchyby odległości zbiegają do 0.

3.2 Implementacja algorytmów sterowania dla zespołu robotów nieholonomicznych

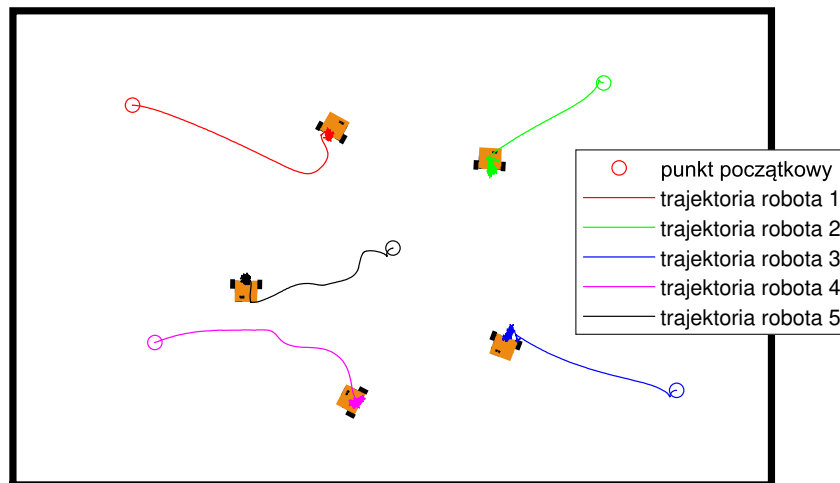
W pracy przedstawiono implementację algorytmów sterowania formacją dla robotów nieholonomicznych. W tym celu zastosowano odwzorowanie sterowania obliczonego dla punktu kinematycznego na kinematykę robota klasy $(2,0)$ przy pomocy przekształcenia opisanego w [10, 17] (w literaturze zwyczajowo określanego przez termin ang. *near-identity diffeomorphism*, NID).

Przeprowadzone badania na rzeczywistych robotach zweryfikowały poprawności proponowanych algorytmów sterujących formacją robotów.

Ponadto pokazano możliwość zastosowania algorytmów sterowania formacją robotów mobilnych opracowanych dla układów o uproszczonej dynamice.

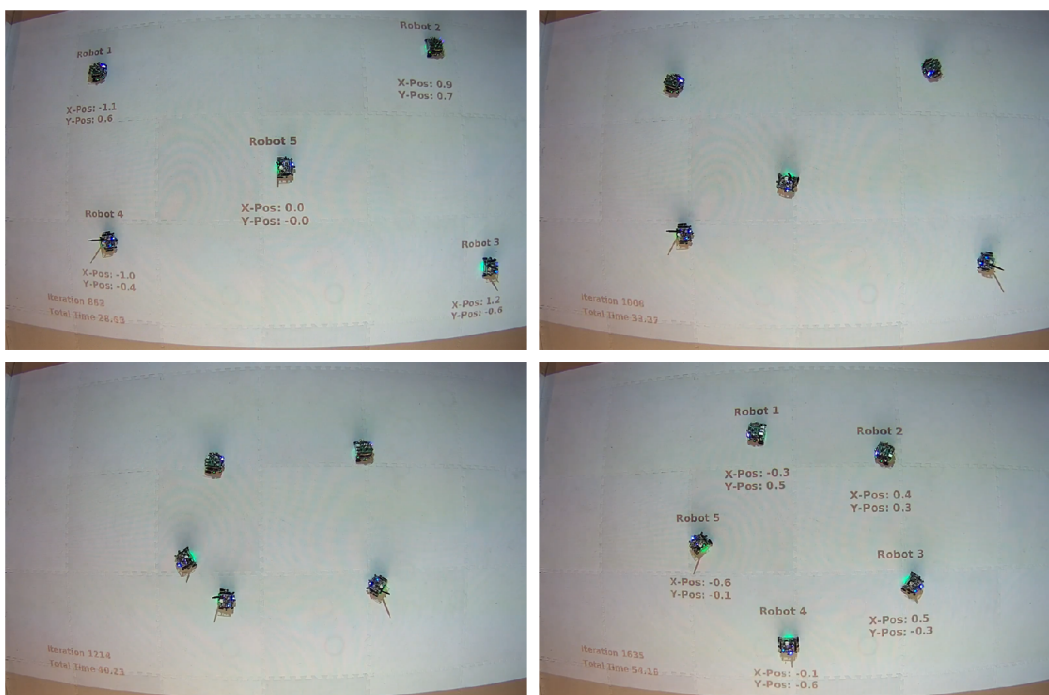
Przykładowy wynik eksperymentu polegającego na osiągnięciu przez roboty figury pięciokąta foremego został przedstawiony na rysunku ???. Czarną obwiednią zaznaczono obszar roboczy platformy testowej. Punkty początkowe robotów zostały oznaczone kołami w kolorze czerwonym, zielonym, niebieskim, różowym i czarnym

odpowiednio dla robota pierwszego, drugiego, trzeciego, czwartego i piątego. Symbolem robota zaznaczono końcowe położenie w eksperymencie.



Rysunek 3.3: Ruch robotów zaznaczony na płaszczyźnie XY

Na rysunku 3.4 przedstawiono migawki z przeprowadzonego eksperymentu. Na pierwszym kadrze widać położenia robotów w początkowej chwili eksperymentu. Kolejne dwa kadry przedstawiają pozycję robotów w czwartej i jedenastej sekundzie eksperymentu w trakcie zmiany położenia. Ostatni kadr przedstawia roboty po osiągnięciu zadanej formacji. Na początku eksperymentu oraz po osiągnięciu zadanej odległości projektor umieszczony ponad platformą wyświetla informację o numerze robotów oraz ich początkowym i końcowym położeniu.

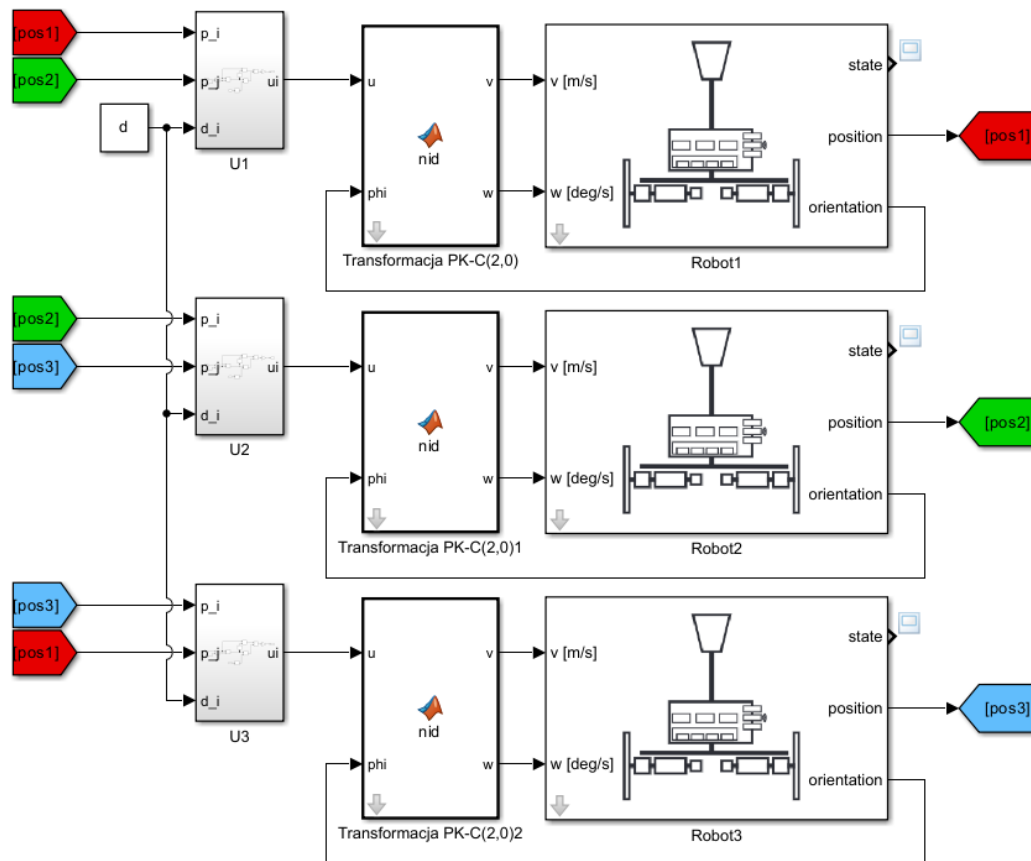


Rysunek 3.4: Migawki z nagrania rzeczywistego eksperymentu dla początku eksperymentu, czwartej i jedenastej sekundy oraz po osiągnięciu pozycji zadanej

3.3 Implementacja algorytmów sterowania dla zespołu robotów niestabilnych oraz budowa środowiska sprzętowo – programowego umożliwiającego ich testowanie

Najważniejszym wynikiem pracy jest opracowanie kaskadowego regulatora składającego się z trzech członów. Wewnętrzna pętla sprzężenia zwrotnego odpowiedzialna jest za stabilizację robota oraz umożliwia nadążanie za sygnałami referencyjnymi prędkości liniowej i kątowej. Zewnętrzna pętla stanowi implementację algorytmów sterowania formacją bazującą na wirtualnych potencjałach pomiędzy robotami. Ostatnim elementem jest blok realizujący przekształcenie sterowania obliczonego dla punktów kinematycznych na kinematykę robota nieholonomicznego.

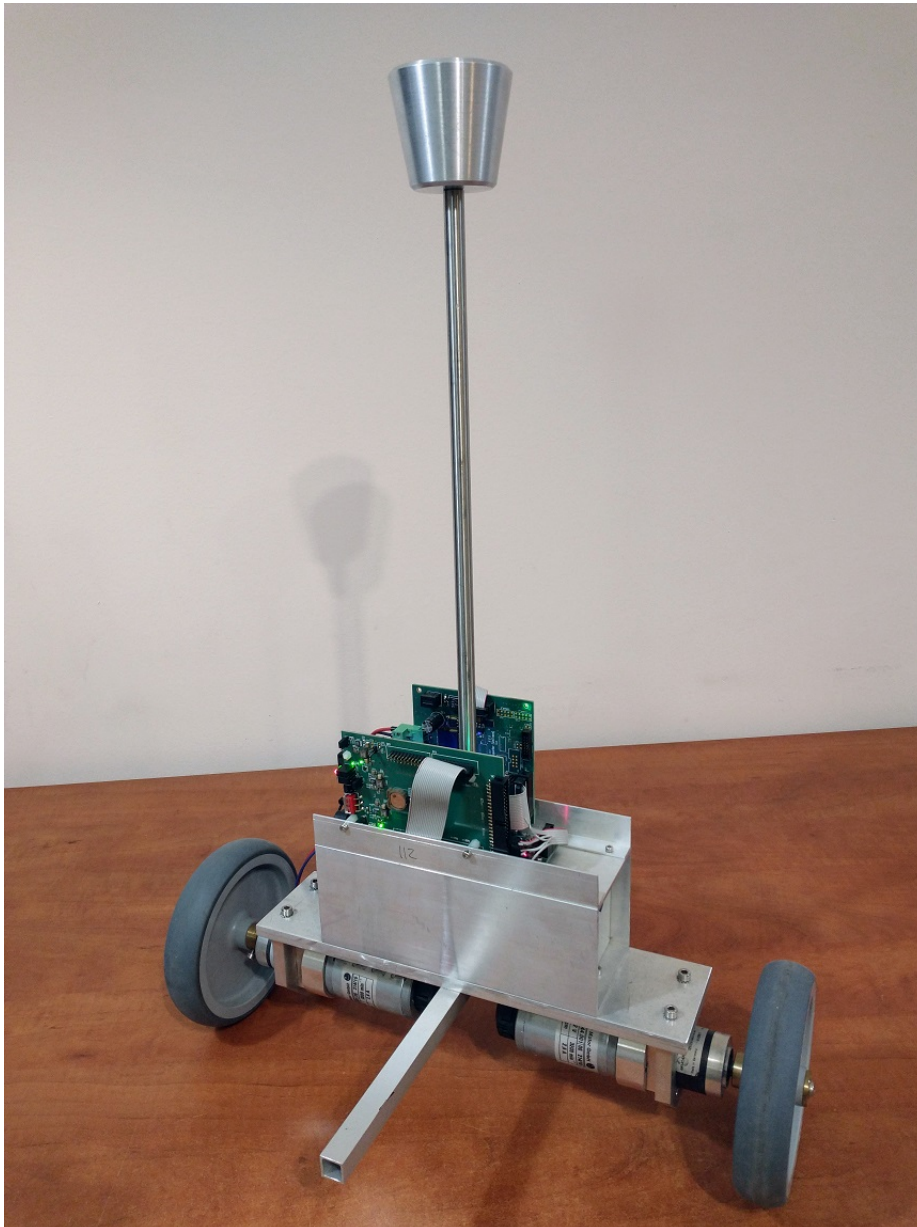
Przykładowy wygląd systemu sterującego, w postaci diagramu blokowego, realizującego zadanie cyklicznej pogoni został przedstawiony na rysunku 3.5 .



Rysunek 3.5: Schemat blokowy algorytmu sterującego formacją trzech robotów

Dodatkowy cel pracy zakładał powstanie platformy programowo – sprzętowej umożliwiającej testowanie algorytmów sterowania dla zespołu robotów. Efektem realizacji tego zadania było powstanie dwukołowego niestabilnego robota mobilnego, przedstawionego na rysunku 3.6. Jest to pojazd zaprojektowany do realizacji

eksperymentów związanych ze sterowaniem. Zastosowane rozwiązania sprzętowo-programowe m.in. zasilanie bateryjne i wbudowany system sterujący pozwalają na autonomiczną pracę. Programowanie i nadzór nad robotem odbywa się przy pomocy komputera PC. Dzięki integracji z pakietem MATLAB/Simulink wszystkie etapy opracowania algorytmu sterującego mogą zostać przeprowadzone w jednym środowisku.



Rysunek 3.6: Fotografia dwukołowego, niestabilnego robota mobilnego

4 Podsumowanie

Przedmiotem badań opisanych w rozprawie były rozproszone algorytmy sterowania zespołem współpracujących robotów mobilnych. Analizowano metody sterowania bazujące na wzajemnych odległościach pomiędzy pojazdami, przy założeniu, że globalny układ współrzędnych jest nieznany dla poszczególnych pojazdów. Punktem wyjścia prowadzonych badań były prace dotyczące sterowania formacją robotów mobilnych, w których wykorzystano sztuczne potencjały do definicji algorytmu osiągniętego zadania formację [15, 4, 7].

Głównym celem pracy było opracowanie algorytmów sterowania rozproszonego dla układów zbudowanych z wielu autonomicznych robotów mobilnych. Dodatkowym celem była budowa środowiska sprzętowo — programowego umożliwiającego prowadzenie badań eksperymentalnych algorytmów sterowania dla niestabilnych robotów mobilnych.

Pierwszy cel pracy został osiągnięty przez opracowanie algorytmów sterujących dla uproszczonych modeli pojazdów, a następnie ich adaptację dla robotów mobilnych, których kinematyka i dynamika jest opisana bardziej złożonymi modelami. W przypadku robotów klasy (2,0) wprowadzono przekształcenie sterowania dostosowane do ograniczeń nieholonomicznych. W przypadku niestabilnych robotów zaprojektowano kaskadowy układ regulacji, gdzie wewnętrzna pętla sprzężenia zwrotnego odpowiedzialna była za utrzymanie robota w górnym, niestabilnym punkcie równowagi oraz nadsyłanie za sygnałami referencyjnymi, a zewnętrzna pętla sprzężenia zwrotnego realizowała zadanie sterowania formacją. Skonstruowane algorytmy posiadają cechy sterowania lokalnego umożliwiając ich rozproszoną implementację.

Weryfikacja proponowanych metod sterowania została przeprowadzona z wykorzystaniem symulacji komputerowych oraz badania na rzeczywistych stanowiskach robotów mobilnych. Wyniki eksperymentów potwierdziły skuteczność proponowanych algorytmów sterowania w różnych scenariuszach, co podkreśla ich aplikacyjny charakter. Uzyskane rezultaty są spójne z przewidywaniami opisanymi w [9] oraz [19].

Dodatkowy cel pracy został osiągnięty przez budowę stanowiska laboratoryjnego złożonego z niestabilnych robotów mobilnych. Integracja jednostki sterującej robotem z platformą sprzętowo – programową RT-DAQ/Zynq zapewniła możliwość użycia graficznych narzędzi modelowania i symulacji (MATLAB/Simulink) oraz odwoływanie się do modelu obiektu podczas projektowania i weryfikacji algorytmu sterowania. Takie podejście jest zgodne z metodologią projektowania algorytmów sterowania korzystającą z modelu matematycznego obiektu

(MBD). Przyjęte rozwiązanie znacznie ułatwiło przeprowadzenie procesów modelowania, identyfikacji i syntezy regulatorów. Zadanie to zostało zrealizowane we współpracy z firmą INTECO w ramach projektu badawczo-rozwojowego NCBIR (INNOTECH-K1/HI1/12/158460/ NCBR/12), a powstałe urządzenie zostało wdrożone do oferty firmy INTECO.

Na podstawie sformułowanych celów pracy do jej głównych rezultatów należy zaliczyć:

1. Opracowanie i implementacja rozproszonych algorytmów sterujących dla zespołu niestabilnych robotów mobilnych. Głównymi składnikami proponowanego algorytmu są stabilizujący regulatora od stanu, regulator sterujący formacją i funkcja odwzorowująca kinematykę obiektu bez ograniczeń na sterowanie na kinematykę nieholonomicznego pojazdu.
2. Opracowanie algorytmu śledzenie lidera, w którym odległości pomiędzy robotami są zależne od prędkości lidera oraz weryfikacja eksperymentalna proponowanego algorytmu.
3. Implementacja i weryfikacja algorytmów sterujących dla zespołu robotów klasy (2,0).
4. Formalny opis układu, w tym wykazanie asymptotycznej stabilności oraz obszaru atrakcji punktów równowagi układu dla 2 obiektów i symetrycznej komunikacji oraz 3 obiektów i kierunkowej wymiany informacji.
5. Opracowanie modelu matematycznego dwukołowego, niestabilnego pojazdu i identyfikacja jego parametrów.
6. Budowa robota mobilnego i integracja z platformą sprzętowo-programową umożliwiającą prowadzenie badań eksperymentalnych.

4.1 Kierunki dalszych badań

Przedstawione w pracy rozwiązania nie wyczerpują wszystkich możliwości sterowania zespołem robotów mobilnych. Dotyczy to zarówno zaproponowanych algorytmów sterowania jak i założonego celu sterowania. Uzyskane wyniki mogą stanowić wstęp do dalszych badań.

Szczególnie interesujące jest przeprowadzenia badań eksperymentalnych z wykorzystaniem większej liczby niestabilnych robotów mobilnych. Otwiera to dodatkowe możliwości badawcze dotyczące, na przykład:

- opracowania i implementacji algorytmów wykrywania przeszkód i unikania kolizji,
- czasowej synchronizacji pomiarów i sterowania rozproszonego układu regulacji.

Inny ciekawy kierunek badań związany jest z wyposażeniem pojazdów w zestaw sensorów dostarczających informacji o względnym położeniu sąsiadów oraz otoczeniu. Wykorzystanie czujników takich jak kamera, lidar czy czujniki zbliżeniowe, a więc sensory dostępne we współczesnych samochodach, zwiększy aplikacyjny charakter prowadzonych badań oraz pozwoli na analizę wpływu zakłóceń pomiarowych na algorytmy sterowania formacją robotów.

Zagadnienia te będą stanowić temat przyszłych badań autora.

4.2 Wnioski

Przeprowadzone badania symulacyjne i eksperymentalne pozwoliły zrealizować wyznaczone zadania naukowe i przedstawione cele pracy. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że:

1. Rozproszone algorytmy sterowania, oparte na sztucznych potencjałach, są skuteczne w koordynacji zespołu robotów mobilnych.
2. Algorytmy bazujące na lokalnych pomiarach i sterowaniu pozwalają uzyskać globalny cel sterowania.
3. Przekształcenie sterowania obliczonego dla punktów kinematycznych na kinematykę nieholonomicznego robota zachowuje właściwość asymptotycznej stabilności układu.
4. Można sterować formacją robotów o niestabilnej dynamice pod warunkiem zastosowania stabilizującego regulatora.
5. Metodologia projektowania algorytmów oparta na modelowaniu matematycznym pozwala na ich weryfikację na wczesnych etapach. Dzięki temu przyczynia się do skrócenia czasu potrzebnego na wykonanie zadania.

Przedstawione rozwiązania mają potencjałe zastosowania w różnych dziedzinach, wśród których można wymienić: logistykę (np. zrobotyzowane magazyny), transport (np. systemy wspomagające kierowcę) czy technologie kosmiczne (np. satelitarne loty formacyjne). Podsumowując, praca wnosi istotny wkład w rozwój technologii sterowania rozproszonego zespołem współpracujących robotów mobilnych.

Literatura

- [1] Brian D. O. Anderson, Changbin Yu, Soura Dasgupta, and A. Stephen Morse. Control of a three-coleader formation in the plane. *Systems & Control Letters*, 56(9-10):573–578, 2007.
- [2] J. Baillieul and A. Suri. Information patterns and hedging brockett’s theorem in controlling vehicle formations. In *42nd IEEE International Conference on Decision and Control (IEEE Cat. No.03CH37475)*, volume 1, pages 556–563 Vol.1, 2003.
- [3] Mitch Champion, Prakash Ranganathan, and Saleh Faruque. Uav swarm communication and control architectures: a review. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 7(2):93–106, 2019.
- [4] M. Cao, A. S. Morse, C. Yu, B. D. O. Anderson, and S. Dasguyta. Controlling a triangular formation of mobile autonomous agents. In *2007 46th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 3603–3608, 2007.
- [5] Dimos V. Dimarogonas and Karl H. Johansson. On the stability of distance-based formation control. In *47th IEEE Conference on Decision and Control*. IEEE, 2008.
- [6] Min Hu, Guoqiang Zeng, and Hong Yao. Coordination control of distributed spacecraft system. In Rushi Ghadawala, editor, *Advances in Spacecraft Systems and Orbit Determination*, chapter 6. IntechOpen, Rijeka, 2012.
- [7] Laura Krick, Mireille E Broucke, and Bruce A Francis. Stabilisation of infinitesimally rigid formations of multi-robot networks. *International Journal of control*, 82(3):423–439, 2008.
- [8] Mehran Mesbahi and Magnus Egerstedt. *Graph Theoretic Methods in Multiagent Networks*, volume 33. Princeton University Press, 2010.
- [9] P. Ogren, M. Egerstedt, and X. Hu. A control lyapunov function approach to multi-agent coordination. In *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.01CH37228)*, volume 2, pages 1150–1155 vol.2, 2001.
- [10] R. Olfati-Saber. Near-identity diffeomorphisms and exponential ϵ -tracking and ϵ -stabilization of first-order nonholonomic se(2) vehicles. In *Proceedings of the 2002 American Control Conference (IEEE Cat. No.CH37301)*, volume 6, pages 4690–4695 vol.6, 2002.

- [11] Reza Olfati-Saber and Richard M. Murray. Distributed cooperative control of multiple vehicle formations using structural potential functions. *IFAC Proceedings Volumes*, 35(1):495–500, 2002.
- [12] Jaime Luis Ramirez Riberos. *New decentralized algorithms for spacecraft formation control based on a cyclic approach*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [13] Craig W. Reynolds. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 21(4):25–34, 1987.
- [14] D.P. Scharf, F.Y. Hadaegh, and S.R. Ploen. A survey of spacecraft formation flying guidance and control. part ii: control. In *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, volume 4, pages 2976–2985 vol.4, 2004.
- [15] Stephen L Smith, Mireille E Broucke, and Bruce A Francis. Stabilizing a multi-agent system to an equilateral polygon formation. In *Proc. of the 17th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems*, pages 2415–2424, 2006.
- [16] Tamas Vicsek, Andras Czirok, Eshel Ben-Jacob, Inon Cohen, and Ofer Sochet. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles. *Physical Review Letters*, 75(6), 1995.
- [17] Sean Wilson, Paul Glotfelter, Li Wang, Siddharth Mayya, Gennaro Notomista, Mark Mote, and Magnus Egerstedt. The robotarium: Globally impactful opportunities, challenges, and lessons learned in remote-access, distributed control of multirobot systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 40(1):26–44, 2020.
- [18] Paweł Zagórski. *Nanosatellite attitude estimation*. PhD thesis, AGH Univeristy of Krakow, 2017.
- [19] Shiyu Zhao and Zhiyong Sun. Defend the practicality of single-integrator models in multi-robot coordination control. In *2017 13th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA)*, pages 666–671, 2017.
- [20] Yongkun Zhou, Bin Rao, and Wei Wang. Uav swarm intelligence: Recent advances and future trends. *IEEE Access*, 8:183856–183878, 2020.