

Prof. dr hab. inż. Bogdan Sapiński
Katedra Automatyzacji Procesów
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Kraków, dnia 08.07.2024.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. **Arkadiusza Bożko**

pt.

„Nawigacja i sterowanie grupą robotów mobilnych z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego”

promotor: prof. dr hab. **Ewa Pawłuszewicz**

opracowana na podstawie pisma WIM-II.4130.10.24 z dnia 18.04.2024 Przewodniczącego Rady Naukowej Wydział Mechaniczny Politechniki Białostockiej prof. dr. hab. inż. Romualda Mosdorfa.

1. Informacje podstawowe

Mgr inż. Arkadiusz Bożko odbył studia stacjonarne inżynierskie i magisterskie na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej (WM PB) na kierunku Automatyka i Robotyka. Na piątym semestrze studiów inżynierskich przebywał na University of Southern Denmark w Odense (program Erasmus+). Studia magisterskie ukończył w 2017 roku. W latach 2019–2023 odbył studia doktoranckie na WM PB w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

W okresie od 04/2018 do 12/2020 był zatrudniony na WM PB na stanowisku specjalisty naukowo-technicznego w projekcie AVAL, a dodatkowo od 04/2019 do 07/2019 uczestniczył w opracowaniu systemu autonomicznego omijania przeszkód dla dronów klasy mikro realizowanego przez firmę Under Ant Sp. Komandytowa. Następnie pracował na stanowisku konstruktora-programisty w dziale robotyki firmy Stekop S.A. Jako specjalista naukowo-techniczny był wykonawcą w projekcie PROTECT-MED. Jest autorem stanowiska edukacyjnego aerostatów opracowanego dla firmy Epicentroom Białystok.

Obecnie mgr inż. Arkadiusz Bożko jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym WM PB zatrudnionym na stanowisku asystenta. Na rodzimym wydziale prowadzi zajęcia laboratoryjne i projektowe. Jest współautorem kilku artykułów naukowych oraz naukowo-technicznych, z których najważniejsze opublikowano w czasopismach Journal of Field Robotics, Sensors i Applied Sciences.

2. Tematyka i treść i rozprawy

Tematyka rozprawy nawiązuje do badań nad układami sterowania i nawigacją bezzałogowych statków powietrznych (BSP) prowadzonych od wielu lat przez pracowników naukowych WM PB. Za przykład mogą tu posłużyć m. in. prace zespołu skupionego wcześniej wokół prof. dr. hab. inż. Zdzisława Gosiewskiego, dr hab. inż. Cezarego Kownackiego, prof. PB w zakresie budowy i implementacji układów sterowania

poprawiających właściwości eksploatacyjne BSP, czy też praca doktorska dr. inż. Leszka Ambroziaka dotycząca układu sterowania z dwustanowym algorytmem nawigacyjnym lotem grupowym BSP, który został opisany także w pracy [A101]. Należy podkreślić, że konsekwentne rozwijanie tych badań w jednostce postępuje w ślad za rozwojem technologicznym oraz stosowaniem nowoczesnych metod i narzędzi badawczych.

Rozprawa jest poświęcona badaniom nad zastosowaniem metod sztucznej inteligencji (SI) oraz uczenia maszynowego (UM) do nawigacji i sterowania w lotach grupowych BSP. Głównym jej celem jest wykazanie, że możliwe jest efektywne sterowanie i nawigacja w lotach grupowych BSP przy zastosowaniu metod SI i UM. Do rozwiązania problemu zaproponowano heurystykę, która przeszukuje przestrzeń alternatywnych rozwiązań w celu znalezienia najlepszych z nich. Wykorzystano do tego dwa przygotowane środowiska symulacyjne umożliwiające sterowanie lotami formacji płatowców oraz nawigację w lotach rojów śmigłowców wielowirnikowych, przy użyciu metod grafowych. Przedstawiono opracowany moduł UM, wykorzystujący algorytmy genetyczne (AG), który umożliwia różne sposoby kodowania genotypów w połączeniu z dedykowanymi operatorami genetycznymi. Zaproponowano schemat genotypu pozwalający na opis parametrów algorytmu sterowania w formacji lider-podążający. Dokonano oceny genotypów w kontekście jakości śledzenia i porównano je stosując zaproponowaną funkcję dopasowania. Ta funkcja uwzględnia różne charakterystyki lotu formacji. Przeanalizowano proces UM, który ma być podstawą metody do uzyskania rozwiązania optymalnego oraz przedstawiono algorytm sterowania i nawigacji roju BSP w ciasnych przestrzeniach przy użyciu pól potencjałowych w ujęciu lokalnym i metod grafowych w ujęciu globalnym. Następnie zastosowano metodę do generowania modeli matematycznych określającą przepustowość tras opisanych za pomocą krawędzi grafu i przeprowadzono testy w środowisku symulacyjnym do badania lotów w roju.

Rozprawa liczy 212 stron. Składa się z 6 rozdziałów, wykazu akronimów, wykazu literatury (124 pozycje), wykazu źródeł on-line (20 pozycji), spisu rysunków, spisu tabel oraz 3 załączników, które obrazują cykl uczenia z wykorzystaniem map imitujących różne warunki w przestrzeni lotu BSP.

W rozdziale 1, posiłkując się pozycjami literatury [A1]–[A17], przedstawiono rys historyczny BSP. Opisano ważniejsze fakty, ewolucję BSP, czynniki przyczyniające do ich rozwoju technologicznego i wzrastające znaczenie BSP w zadaniach wykonywanych przez służby cywilne (np. monitorowanie obszarów objętych zagrożeniami, wydarzeń masowych i zadań niebezpiecznych dla człowieka) oraz przez służby wojskowe (np. misje zbrojne).

W rozdziale 2, korzystając z pozycji literatury [A18]–[A97], przeanalizowano stan badań nad metodami SI. Zwięźle opisano wybrane metody SI i UM uczenia w kontekście zastosowań w BSP. Szczególną uwagę zwrócono na AG, sztuczne sieci neuronowe (głębokie, konwolucyjne, rekurencyjne, generatywne przeciwstawne) i algorytmy inteligencji rozproszonej (mrówkowy, szarych wilków, przeszukiwanie rojem cząstek). Następnie wskazano na zastosowania SI w obszarze rolnictwa, militarnym, monitorowania środowiska, transportu powietrznego, systemów bezpieczeństwa i łączności bezprzewodowej oraz w poszukiwaniach ratunkowych i sytuacjach kryzysowych. Dalej przedstawiono funkcjonalności BSP, w których są wykorzystywane metody SI: nawigacja i wyznaczanie trajektorii, unikanie przeszkód, obszarów wysokiego ryzyka, wymiana danych w systemach łączności bezprzewodowej, diagnostyka systemów, optymalizacja metod sterowania, przydzielanie zadań, analiza danych z sensorów oraz analiza obrazu i dźwięku oraz pomiary odległości przy użyciu czujników laserowych. Podkreślono znaczenie planowania trajektorii BSP, w którym metody wykorzystujące SI i UM zaczynają dominować nad metodami klasycznymi.

W rozdziale 3 sformułowano dwa cele badawcze. Cel 1 jest związany z poprawą wskaźników jakościowych lotu w formacji BSP przy zastosowaniu metod SI. Cel 2 dotyczy wykorzystania metod SI do analizy i opisu parametrów środowiska pracy grupy BSP.

Założono, że cele te można osiągnąć przez realizację dwóch zadań badawczych. Zadanie 1 jest związane z optymalizacją parametrów lotu płatowców w formacji lider-podążający. Aby zrealizować to zadanie utworzono środowisko symulacyjne i moduł UM bazujący na AG oraz analizowano wyniki optymalizacji nastaw regulatorów PID w algorytmie lotu w formacji przy użyciu tychże algorytmów. Zadanie 2 dotyczy opracowania metody umożliwiającej opis cech przestrzeni roboczej pod kątem planowania trajektorii grupy BSP. By zrealizować to zadanie, utworzono środowisko symulacyjne lotu w roju BSP stosując pola potencjałowe i model przepustowości dostępnych tras lotów w przestrzeni roboczej w aspekcie lotów rojów BSP, wykorzystując moduł utworzonego programowania genetycznego.

W rozdziale 4, odnosząc się do prac [A98]–[A112], rozważano problem optymalizacji parametrów sterowania i nawigacji w formacji lider-podążający przy zastosowaniu AG. Scharakteryzowano algorytm wykorzystujący sterowanie wielostanowe, wspierając się modelem matematycznym płatowca, który odwzorowuje jego lot oraz algorytmami sterowania zgrubnego i precyzyjnego. Następnie skupiono się na optymalizacji parametrów algorytmu lider-podążający przy wykorzystaniu AG i implementacji AG w układzie sterowania BSP. W dalszym ciągu opisano testy symulacyjne, w tym testy uproszczone (dobór nastaw regulatorów PID), testy standardowe (dobór wszystkich optymalizowanych parametrów) oraz testy w konfiguracji rozproszonej ze scenariuszami utrudniającymi w różny sposób proces uczenia. Po przeanalizowaniu uzyskanych wyników sformułowano wnioski.

W rozdziale 5, wspierając pracami [A113]–[A124], rozważono zagadnienie sterowania i nawigacji BSP w ciasnych przestrzeniach, wykorzystując do tego pole sztucznego potencjału. Scharakteryzowano koncepcję sterowania polami potencjałowymi, przedstawiono algorytm sterowania i nawigację rojem śmigłowców wielowirnikowych w przestrzeniach zamkniętych zarówno w ujęciu lokalnym i globalnym. Następnie opisano AG optymalizujący współczynniki pola potencjałowego, wyznaczono model przepustowości tras przelotów z wykorzystaniem AG. Dalej przeprowadzono testy, w których w cyklach uczenia wykorzystano mapy imitujące przeszkody w otwartej przestrzeni, plan budynku z wąskimi przejściami, wieloma dostępnymi przejściami i z równoczesną ewaluacją na kilku mapach oraz scharakteryzowano wyznaczanie modelu przepustowości. W zakończeniu przedstawiono wnioski.

W rozdziale 6 zawarto podsumowanie i wnioski końcowe, których odniesiono się sposobu do realizacji postawionych celów badawczych, możliwości uzyskiwania lepszych wyników, oraz efektów utylitarnych.

3. Analiza rozprawy i uwagi krytyczne

Rozprawa ma charakter analityczno-symulacyjny. Działania Autora są zorientowane na opracowanie koncepcji naukowej i przedstawienie płynących z niej korzyści. W rozprawie nie ma klasycznej tezy. Zamiast tego są cele i zadania badawcze. Struktura pracy jest właściwa. Język (z drobnymi zastrzeżeniami) oraz strona redakcyjna są poprawne. Ułatwia to zapoznanie się tekstem rozprawy.

W rozdziale 3, Autor zapowiada opracowanie metodologii, która pozwoli na planowanie trajektorii płatowców w formacji lider-podążający i śmigłowców wielowirnikowych w lotach grupowych przy różnych scenariuszach i wykorzystaniu metod grafowych. W podsumowaniu nie pisze jednak wprost o metodologii, natomiast przedstawia pewne jej elementy. Można odnieść wrażenie, że chce raczej odpowiedzieć na pytanie, czy zaproponowane badanie będzie miało charakter potwierdzający i w konsekwencji przyjęta metoda badań okaże się skuteczna. Odpowiedzi na to pytanie poszukuje w rozdziałach 4 i 5, w których opisuje sposób realizacji celów badawczych i towarzyszących im zadań.

W rozdziale 4 opisuje realizację celu 1. Korzystając z pracy [A101], adaptuje dla wybranego modelu płatowca Bulit 60, dwustanowy algorytm lider-podążający z modyfikacjami, które wynikają z konieczności uwzględnienia ograniczeń takich jak, nieholonomiczność obiektu, względnie duża prędkość postępową i niemożność krótkookresowego wytracania prędkości. Zgodnie z tym algorytmem, w pierwszym kroku, podążający BSP wyznacza azymut w kierunku lidera formacji, a następnie wyznaczona wartość jest przekazywana z kontrolera formacji do kontrolera kierunku płatowca wraz z wartością zadanej obliczonej prędkości postępowej na wyjściu regulatora P (algorytm sterowania zgrubnego). Przy tym sterowaniu jest możliwe płynne zmniejszanie odległości do celu na dużych dystansach przy optymalnej charakterystyce lotu. Przy krótszych dystansach jest wykorzystywany algorytm sterowania precyzyjnego, w którym zadane wartości prędkości i kierunku lotu BSP są wyznaczane za pomocą regulatorów PID. Pozwala to na uzyskanie dokładnej pozycji oraz jej utrzymanie mimo manewrów lidera. Przepływ informacji w obu ww. algorytmach zobrazowano na rys. 4.8 i 4.9. Przełączanie między algorytmami następuje przy wykorzystaniu histerezy związanej z odległością pomiędzy liderem i podążającym (rys. 4.7). Zaadaptowany algorytm i model matematyczny płatowca (punkt 4.2.1) wraz z modulem UM wykorzystującym AG implementuje w środowisku MATLAB/Simulink. Aby można było porównać jakość otrzymywanych rozwiązań, wprowadza kluczową dla poprawnego działania AG funkcję dopasowania F_1 (wzór 23), w której występują trzy współczynniki, energetyczny E_f (wzór 24), przełączania S_f (wzór 25) i czasu T_f (wzór 26). Mają one uwzględnić wpływ różnych czynników na jakość śledzenia. Do badania scharakteryzowanego algorytmu dwustanowego BSP w formacji lider-podążający definiuje dziewięć parametrów. Są to nastawy dwóch regulatorów PID prędkości (P_a , I_a , D_a) i kierunku (P_h , I_h , D_h) BSP podążającego, błędy śledzenia odpowiadające punktom przełączania histerezy R_1 i R_2 oraz współczynnik k_v modyfikujący prędkość podążającego obiektu w trybie śledzenia zgrubnego. Te parametry są kodowane kolejno przez geny G_1 – G_6 oraz G_7 , G_8 i G_9 i przetwarzane zgodnie z opisanym mechanizmem (str. 64–66). W procesie uczenia transkrypcja genów odbywa się przed rozpoczęciem symulacji zachowania danego genomu według zależności (wzór 28). Występujące w tym wzorze współczynniki k_{s1} i k_{s2} o postaci wektorowej odpowiadają za wyskalowanie planowanego zakresu wartości cechy fenotypowej i przesunięcia jego środka na osi liczbowej. Wartości tych współczynników (wyznaczone empirycznie) zamieszczono w tab. 4.1. W dalszym ciągu zakłada, że testy symulacyjne zostaną przeprowadzone dla populacji liczącej 20 osobników i cyklu uczenia określonego na 40 generacji. Rozpoczyna je od konfiguracji uproszczonej – dobór: P_a , I_a , D_a i P_h , I_h , D_h , a następnie standardowej – dobór: P_a , I_a , D_a i P_h , I_h , D_h , R_1 , R_2 , k_v . Testy przeprowadza przy trajektoriach lotu lidera, które różnią się prędkością i orientacją początkową obiektu podążającego i wyznaczonym eksperymentalnie czasem symulacji. Dla obu konfiguracji analizuje przebiegi funkcji dopasowania osiągnięte w kolejnych cyklach uczenia. Następnie porównuje trajektorie lotu BSP (rys. 4. 15) oraz uchyby regulacji nastaw regulatorów PID kierunku i prędkości lotu e_v , e_φ (rys. 4.16) odnoszące się do tychże trajektorii i nastaw regulatorów dobranych intuicyjnie oraz optymalizowanych z zastosowaniem AG. Testy kończy przedstawieniem zmian nastaw regulatorów PID w kolejnych generacjach cykli uczenia (rys. 4.18). Uzyskane testów prowadzą do wniosku, że uchyb regulatora prędkości jest większy niż regulatora kierunku, co może być uznane za kryterium zakończenia procesu uczenia w podobnych przypadkach jak rozważany w rozprawie. Następnie przeprowadza testy rozszerzone przy scenariuszach utrudniających proces uczenia, aby w ten sposób spowodować, że końcowe genotypy będą bardziej odporne na zakłócenia występujące w przestrzeni roboczej i jednocześnie wskazać na ograniczenia procesu uczenia. W tym celu modyfikuje zakres początkowych wartości optymalizowanych parametrów, trajektorię lotu lidera formacji i dynamiczne zmiany prędkości lotu lidera. Wyniki testów przy różnych scenariuszach,

prezentuje na rys. 4.19 i 4.21 (ewolucje funkcji dopasowania) oraz na rys. 4.22- 4.28 (ewolucja genów kodujących nastawy regulatorów PID). Chcąc pokazać zalety zmodyfikowanego algorytmu, porównuje uzyskane trajektorie BSP podążającego w wersji optymalizowanej i dwustanowego w odniesieniu do trajektorii lidera (rys. 4.32) oraz przedstawia tab. 4.2, w której dla wybranych czasów, podaje wartości funkcji dopasowania F_1 , funkcji śledzenia F_0 (wzór 31), współczynnika energetycznego E_f i stwierdza, że wysoka jakość śledzenia pozwala na optymalizację zużycia energii przez BSP.

Uważam, że adaptacja algorytmu została przeprowadzona poprawnie. Potwierdzają to wyniki testach pokazujące zalety zmodyfikowanego algorytmu w porównaniu do algorytmu dwustanowego. Podsumowując ten rozdział rozprawy uznaję, że cel 1, tzn. poprawa wskaźników jakościowych lotu płatowca w formacji lider-podążający, został w pełni zrealizowany.

W rozdziale 5, Autor podejmuje próbę zrealizowania celu 2, a więc wykorzystania koncepcji pola sztucznego potencjału do sterowania i nawigacji rojem BSP. Koncepcja ta, wywodząca się z zagadnień sterowania robotami przemysłowymi, daje możliwość prostej unifikacji różnych informacji do pojedynczej wielkości, która zawiera informacje zarówno o zachowaniu BSP wynikającego z jego kinematyki oraz dynamiki jak i o środowisku pracy. Według tej koncepcji, każdemu elementowi układu jest przypisywany pewien potencjał, przy czym docelowy stan BSP opisuje się za pomocą dodatniego potencjału, natomiast oddziaływanie nań środowiska za pomocą ujemnego potencjału. Przytaczając pracę [A116] zakłada, że pomimo problemów związanych z implementacją tej koncepcji w realnych warunkach (studnia potencjału, wąskie przejścia, oscylacje w pobliżu przeszkód, oscylacje składowych wektora stanu), jest możliwe uzyskanie bezpiecznej trajektorii ruchu BSP i osiągnięcia zadanej pozycji. Opracowuje więc algorytm dedykowany sterowaniu lotem roju mikro BSP w konfiguracji wielowirnikowców w przestrzeniach zamkniętych, którego zadaniem jest przelot roju do punktu docelowego w najkrótszym czasie i minimalnym ryzyku wystąpienia kolizji. Próbę spełnienia tych dwóch wymagań chce osiągnąć przez kombinację ujęcia globalnego w planowaniu tras przelotów i lokalnego sterowania każdym BSP w ich lokalnych układach odniesienia. Przy takim podejściu, trajektorie każdego BSP są zbliżone do wyznaczonych optymalnych tras przelotów, a jednocześnie kształt tych trajektorii uwzględnia działanie pozwalające na unikanie kolizji z innymi obiektami roju, obszarami zdefiniowanymi na mapie jako niedostępne i innymi obiektami statycznymi dynamicznymi wykrywanymi przez czujniki zintegrowane z BSP. Zaproponowany algorytm pozwala na zaplanowanie quasi-optymalnych tras przelotu i zakłada, że każdy BSP dysponuje informacją o swoim położeniu i orientacji w przestrzeni. Do opracowania algorytmu przyjmuje pewne założenia upraszczające. Odnosząc się do nawigacji w ujęciu globalnym takimi założeniami są: niemożność przelotów BSP nad sobą (oznacza to ruch tylko na płaszczyźnie), do przedstawiania uproszczonej mapy przestrzeni roboczej stosuje się grafy, których pojedyncze krawędzie mają przypisane wagi związane z przepustowością tras, tworzony graf powinien pokrywać całą mapę, aby można było planować wiele tras, układ wierzchołków grafu (punktów docelowych) powinien zapewnić, że jego krawędzie po nałożeniu na mapę nie będą przecinać się z obszarami traktowanymi jako przeszkody, dostarczenie do systemu mapy rastrowej o pikselach reprezentujących obszar, którego wymiary są porównywalne z wymiarami odpowiadającymi połowie obszaru reprezentującego BSP w roju, piksele na mapie przyjmują wartości binarne i zawierają informacje wyłącznie o dostępności danego obszaru dla obiektów roju, konwersja mapy odbywa się w krokach 1–5 (str. 96–99). Tak powstały graf pozwala wyznaczyć wszystkie trasy pomiędzy dwoma wierzchołkami, a więc docelowo pomiędzy wierzchołkami start i cel. Zależnie od topologii, wymiarów i liczby obiektów dynamicznych poruszających się daną trasą, trasy i ich przecięcia, mogą mieć różne przepustowości. W zależności od zbioru parametrów na to wpływających, można utworzyć

model pozwalający na estymację czasu potrzebnego do pokonania danej krawędzi grafu (rys. 5.3). Wszystkim krawędziom modelu grafowego mapy są przypisywane wstępne wagi, do których wyznaczenia jest wykorzystywany model przepustowości tras przy zerowej liczbie BSP przypisanej wszystkim krawędziom. Dalej jest wyznaczana najkrótsza trasa dla pojedynczego BSP o indeksie $i=1$ z wierzchołka początkowego do docelowego przy zastosowaniu algorytmów wyznaczania najkrótszej drogi w grafie nieskierowanym. Ta trasa zostaje przypisana do jednego BSP w roju, a następnie aktualizowane są wagi grafu na trasie przelotu zgodnie z modelem przepustowości, ale już przy obecności BSP na trasie. Kolejne kroki to powtarzanie czynności dla wszystkich BSP w roju (rys. 5.8).

Mając na uwadze, że planowanie tras w ujęciu globalnym nie zapewnia unikania kolizji na trasie, zwłaszcza z obiektami statycznymi i dynamicznymi, wprowadza sterowanie lokalne obiektami roju wykorzystując do tego pola potencjałowe. Ze względu na dynamiczną zmianę wierzchołków grafu podczas poruszania się BSP, może on mieć przypisany inny wektor stanu, do którego dąży w ujęciu lokalnym. To z kolei wymaga wyznaczania pola potencjału addytywnego oddzielnie dla każdego obiektu w roju opisującego przyciąganie BSP w danym punkcie do jego aktualnego punktu docelowego, który wynika z poruszania się po ścieżce w grafowej reprezentacji mapy. Na potencjał lokalny oddziaływujący na każdy BSP mają wpływ trzy czynniki: potencjał repulsywny statyczny U_{rs} (wzór 37), potencjał repulsywny dynamiczny U_{rd} (wzór 38), potencjał addytywny U_a (wzór 39). Współczynniki ζ_s , ζ_d , ζ_a w tych wzorach odpowiadają za efektywny przelot roju w obszarze zaznaczonym na mapie, minimalizując ograniczenia pola potencjałowego. Suma tych potencjałów daje potencjał wypadkowy U (wzór 40). W testach symulacyjnych zakłada, że obiektami badań są wielowirnikowce latające w roju. Następnie, wspierając się pracami [A122], [A123], dobiera kształt funkcji opisujących składowe pola potencjałowego. Przyjmuje, że środowiskiem roboczym będzie przestrzeń dwuwymiarowa, co ułatwia opis stanu BSP. Do wyliczania odległości między wierzchołkami (punktami na mapie) posługuje się metryką euklidesową. Wprowadza również wielkości opisujące przemieszczanie się BSP: v_{max} – maksymalną prędkość, a_{max} – maksymalne przyspieszenie, współczynnik k_t – określający ograniczenie prędkości obiektu. Następnie dobiera dla nich wartości, które określają możliwości bezpiecznego przemieszczania się BSP. Do optymalizacji współczynników pola potencjałowego wykorzystuje moduł UM z AG. Przyjmuje liczebność populacji 20 osobników i liczbę cykli uczenia 40 generacji. Postępuje więc podobnie jak to miało miejsc przy implementacji AG dla lotu BSP w formacji lider-podążający. Genotyp utworzony na potrzeby AG optymalizującego współczynniki pola potencjałowego składa się z dziewięciu genów (rys. 5.12): MV – gen kodujący maksymalną prędkość v_{max} pojedynczego BSP, MA – gen kodujący maksymalne przyspieszenie a_{max} pojedynczego BSP, USG – gen kodujący współczynnik wzmocnienia potencjału repulsywnego statycznego, USR – gen kodujący promień oddziaływania potencjału repulsywnego statycznego, UDG – gen kodujący współczynnik wzmocnienia potencjału repulsywnego dynamicznego, UDR – gen kodujący promień oddziaływania potencjału repulsywnego dynamicznego, UAG – gen kodujący współczynnik wzmocnienia potencjału addytywnego, UAR – gen kodujący promień oddziaływania potencjału addytywnego, D – gen kodujący współczynnik tłumienia prędkości lotu. Wartości parametrów skalowania genów do współczynników w AG odpowiadającym za sterowanie polem potencjałowym zamieszcza w tab. 5.1.

Do symulacji zakłada, że przekroczenie przez BSP dopuszczalnego czasu lotu t_{max} , co oznacza nieosiągnięcie przez niego zakładanego celu. W przypadku kolizji obiektów, wszystkie uczestniczące w niej są usuwane z symulacji. Aby można było porównywać genotypy w etapie optymalizacji współczynników pola potencjałowego, formułuje funkcję dopasowania F_2 (wzór 43). W symulacjach przyjmuje, że rój liczy 25 BSP, początkowe pozycje będą generowane losowo w odległości ≤ 20 m od miejsca startu, we wszystkich

cyklach uczenia i generacjach punkty startowe i docelowe będą takie same, przy czym dokładne pozycje startowe każdego obiektu w sąsiedztwie punktu startowego będą losowane dla każdej generacji. Trasy dla każdego obiektu wyznacza, poszukując najkrótszych ścieżek w grafie. Wagi początkowe przypisane krawędziom są równe odległościom pomiędzy wierzchołkami. Po przypisaniu trasy dla obiektu, wagi wszystkich krawędzi tworzących trasę poddaje się aktualizacji zgodnie z wzorem (44). Na rys. 5.14 pokazuje przebieg przykładowej funkcji dopasowania F_2 , otrzymanej przy 43 cyklach uczenia parametrów pola potencjałowego. Jak można zauważyć, jest on podobny do przebiegów funkcji F_1 (rys. 4.13, 4.14). Dalsze testy wykonuje, przyjmując wartości parametrów pola potencjałowego odpowiadające najlepszemu genotypowi optymalizującemu zachowanie się roju BSP podczas lotu w ciasnych przestrzeniach (tab. 5.2). Równoczesna implementacja podejścia lokalnego i globalnego do nawigacji wymaga wyznaczenia modelu matematycznego umożliwiającego porównywanie wyznaczanych tras, który będzie uwzględniał czas niezbędny na ich pokonanie. Do tego musi być zapewniona możliwość oceny przepustowości tras, co pozwala zminimalizować ryzyko powstania zatorów na trasie w tzw. wąskich gardłach. W dalszym ciągu przyjmuje, że modelami reprezentującymi przepustowość tras będą funkcje matematyczne i wykorzystuje do tego celu programowanie genetyczne kartezjańskie. Opis modelu generowania przepustowości tras wg. tak przyjętej koncepcji opisano szczegółowo w punktach 5.3.1–5.36. Testy symulacyjne przeprowadza zgodnie z zaproponowaną metodą sterowania i nawigacji rojem BSP. Do testów wykorzystuje następujące mapy przestrzeni roboczej: m_1 – imituje przeszkody w otwartej przestrzeni, m_2 – imituje plan budynku z wąskimi przejściami, m_3 – imitująca plan budynku z wieloma dostępnymi przejściami. Dodatkowo przeprowadza testy z równoczesną ewaluacją na kilku mapach, wprowadzając funkcję dopasowania F_3 (wzór 51), a także testy z analitycznie utworzoną funkcją przepustowości P (wzór 52). Mapy m_1 , m_2 , m_3 odwzorowują środowisko, w którym może znajdować się rój BSP. Testy wykonuje przy użyciu genotypu o strukturze opisanej w punkcie 5.3 i parametrach cykli uczenia wykorzystywanych do zbadania modelu przepustowości podanych w tab. 5.4. Wyniki testów pokazuje dla przypadków z mapami m_1 , m_2 , m_3 , które przedstawiają aktualizację liczby dronów przypisanych do poszczególnych krawędzi w grafie wraz z przypisaniem kolejnych tras do BSP, aktualizację wag krawędzi w grafowej reprezentacji mapy wraz z przypisaniem kolejnych tras do BSP, porównanie trajektorii otrzymanych przy użyciu dwóch wybranych genotypów do planowania tras na mapie oraz przebieg funkcji dopasowania F_2 w kolejnych generacjach. Szczegółowe dane dotyczące opisanego w każdym przypadku cyklu uczenia zamieszcza w załącznikach 1, 2, 3. Wyniki testów z równoczesną ewaluacją na kilku mapach i analitycznie utworzoną funkcją przepustowości są dyskusyjne i z pewnością wymagają dalszych badań.

W zakończeniu rozdziału, na podstawie analizy wyników testów przeprowadzonych w opisanych wyżej warunkach, formułuje wnioski oraz określa jakie działania należy podjąć w dalszych badaniach, aby uzyskać bardziej zadowalające rozwiązania niż te przedstawione w rozprawie. Stwierdza m. in., że algorytmy generowania grafowych reprezentacji mapy, przypisywania tras poszczególnym BSP oraz generowania modelu przepustowości spełniają postawione przed nimi zadania i pozwalają na efektywne zaplanowanie lotu BSP.

Podsumowując ten rozdział odnoszę wrażenie, że cel 2 został zrealizowany w takim zakresie, który nie w pełni satysfakcjonuje Autora. Mając świadomość, co należałoby zrobić w następnych etapach badań, przedstawia propozycje pewnych modyfikacji takich jak, wprowadzenie grafu skierowanego, uwzględnienie zmiany kierunku lotu w wierzchołkach, wprowadzenie funkcji dwustanowej, która pozwoliłaby przyjmować różne funkcje modelu przepustowości, czy implementacja mechanizmu wymiany danych między BSP. Trzeba jednak przyznać, iż cel 2 był trudniejszy do osiągnięcia niż cel 1. Wynika to ze złożoności zagadnienia optymalizacji w sterowaniu i nawigacji rojem BSP oraz wad/ograniczeń

zastosowanej metody pola sztucznego potencjału, które uniemożliwiają/utrudniają jej praktyczną implementację w rzeczywistych sytuacjach. Należy także pamiętać, że przy realizacji celu 1, ułatwieniem dla Autora była możliwość odniesienia się do algorytmu dwustanowego, który był pewnego rodzaju „punktem referencyjnym”. Dodatkowym czynnikiem, który mógł mieć na to wpływ była prawdopodobnie presja czasu, która nie sprzyjała możliwości uzyskania lepszych rozwiązań niż te prezentowane w rozprawie.

Przeprowadzona analiza skłania mnie do pewnych pytań, uwag i sugestii. Niektóre z nich zamieszczam poniżej, oczekując na komentarz ze strony Autora.

Pytania

- Jaka utworzenie środowiska symulacyjnego wpływa na jakość otrzymywanych wyników ?
- Które z fragmentów równań (jakich ?) należałoby „oczyścić” i w jaki sposób, aby możliwa była łatwiejsza interpretacja wyników optymalizacji ?
- W jaki sposób dobrano eksperymentalnie kształt funkcji opisujących składowe pola potencjałowego, powołując się na prace [A122] i [A123] ?
- Jak należy rozumieć pojęcia/sformułowania ? m. in.: „wysoka jakość parametrów”, „stabilny lot BSP”, „mapa rastrowa o poszczególnych pikselach reprezentujących obszar porównywalny z połową wielkości BSP”, „liczby naturalne losowane w zakresie od 0 do 1”, etc.

Uwagi

W tekście rozprawy występują pewne błędy redakcyjne (m. in. literowe, stylistyczne, pojęciowe, zapis jednostek): np. str. 93 – „powyższy rozumowania zastosowany”, str. 105 – „wprowadzono wartości/wielkości? opisujące sposób przemieszczania się robotów”, str. 105 – „Tłumienie/Silę tłumiącą ? można opisać...”, str. 105 i 106 – $v_{\max}/V_{\max}$, str. 109 – „przepustowość trasy zależny zależy, str. 99 – „ilość”/liczba?, str. 121 – „...dużą ilością przejść...”, str. 105 – „Wartości powyższych parametrów/wielkości i parametrów ?...” – wartości parametrów odnoszą się raczej do genów ?, str. 108 – „Wykresy te przyjmują dla innych przebiegów opartych o metodę algorytmów genetycznych” ?, str. 121 – „...model pola linebreak[4]...” ?, str. 136 – „...najlepsze uzyskane wartości funkcji...”, „...osiągają gorszą jakość...”, str. 137 – „... w możliwie jak najmniejszy sposób...”, str. 134 – „wartość krawędzi” ?, str. 67 – 100[s], a na str. 108 – 20m.

Sugestie

- Zaproponowane metody nawigacji i sterowania w lotach grupowych BSP wykorzystujące metody SI i UM wymagają eksperymentalnej weryfikacji, np. w badaniach poligonowych.
- Rozważenie wykorzystania bardziej przyjaznego środowiska symulacyjnego.

4. Osiągnięcia rozprawy

Uważam, że najważniejszymi osiągnięciami rozprawy wynikającymi z realizacji celów badawczych 1 i 2 są:

- utworzenie środowiska symulacyjnego do testowania lotów płatowców wraz z modułem UM wykorzystującym AG w środowisku MATLAB/Simulink, które umożliwiają optymalizację parametrów lotu w formacji lider-podążający,
- przeprowadzenie badań pokazujących efektywność optymalizacji wielokryterialnej z uwzględnieniem współczynnika energetycznego w formacji lider-podążający oraz wykazanie zalet zmodyfikowanego algorytmu w porównaniu do wcześniej opracowanego algorytmu dwustanowego,

- utworzenie środowiska symulacyjnego do testowania sterowania i nawigacji roju wielowirnikowców z zaimplementowanym mechanizmem sterowania lokalnego wykorzystującym pole potencjałowe,
- optymalizacja parametrów pola potencjałowego z wykorzystaniem AG oraz algorytmu konwersji map rastrowych na ich grafową reprezentację przystosowaną do planowania lotów rojów BSP,
- przeprowadzenie badań optymalizujących zestaw tras dla roju i porównanie ich z rozwiązaniem analitycznym.

5. Wniosek końcowy

Rozprawa mgr. inż. Arkadiusza Bożko, poświęcona badaniom nad zastosowaniem SI i UM do nawigacji i sterowania w lotach grupowych BSP, jest oryginalnym opracowaniem naukowym. Pracę oceniam pozytywnie. Przemawiają za tym realizacja celów badawczych sformułowanych, po rzetelnej analizie literatury naukowej i dotychczasowego stanu badań, oraz osiągnięcia wymienione w punkcie 4. Opisane badania, głęboka analiza wyników i poprawna ich interpretacja wymagały od Autora dużej wiedzy z zakresu teorii sterowania i mechatroniki, oraz dobrej znajomości zastosowanych metod i narzędzi badawczych. Przedstawione uwagi krytyczne oraz błędy występujące w tekście nie wpływają na ogólną pozytywną ocenę rozprawy.

W związku z powyższym uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Arkadiusza Bożko pt. „Nawigacja i sterowanie grupą robotów mobilnych z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego” spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim określone w ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym i stawiam wniosek o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

