

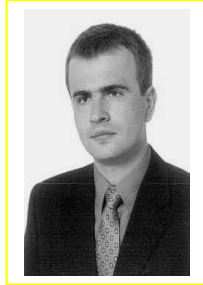
Cezary KOWNACKI

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY,
ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Koncepcja sterowania rojem bezzałogowych obiektów latających

Dr inż. Cezary KOWNACKI

Cezary Kownacki jest pracownikiem Politechniki Białostockiej na stanowisku adiunkta. W 1998 roku ukończył studia magisterskie na kierunku Automatyka i Robotyka Wydziału Elektrycznego PB. W 2005 roku uzyskał tytuł doktora nauk technicznych w dziedzinie budowa i eksploatacja maszyn. Obecnie swoją działalność naukową koncentruje na algorytmach sterowania bezzałogowymi obiektami latającymi, a w szczególności metodami autonomicznego omijania przeszkód.



e-mail: cezarkw@poczta.onet.pl

Streszczenie

W pracy jest przedstawiona koncepcja lotu roju bezzałogowych obiektów latających, oparta na lokalnych regulach sterowania, które można rozpatrywać, jako instynkty zachowania wykorzystujące informacje o położeniu i prędkości pozostałych uczestników lotu. Dla przykładu w momencie, gdy dwa obiekty latające zbliżą się do siebie zbyt blisko, wówczas lokalne systemy sterowania będą modyfikowały kurs i kąt pochylenia tak by obiekty oddaliły się od siebie. Jeśli jeden obiekt latający oddali się zbyt daleko od roju, wówczas kurs i kąt pochylenia tak będą kontrolowane, aby obiekt kierował się w stronę środka ciężkości roju. W sytuacji, gdy zostanie zlokalizowana przeszkoda bezzałogowy obiekt latający będzie się starał zachować bezpieczną odległość od niej. Natomiast sterowanie rojem realizowane jest poprzez wyodrębnienie lidera, który jest kontrolowany przez operatora stacji naziemnej. Sterowanie liderem jest nadrzędną warstwą, która przez przepływ informacji w obrębie roju jest odwzorowywana przez lokalną warstwę sterowania. Pracą przedstawia badania symulacyjne lotu trzech bezzałogowych obiektów latających oparte na opracowanej koncepcji. Potwierdzają one, że proponowana koncepcja jest skuteczna i realizowalna.

Słowa kluczowe: bezzałogowe obiekty latające, lot roju, sterowanie behawioralne, omijanie przeszkód, autonomiczne sterowanie.

The concept of flight control of unmanned aerial vehicles swarm**Abstract**

The flight of unmanned aerial vehicles (UAV) swarm is a complex problem which interconnects different control levels, from local autonomous control law of a single vehicle to rules of swarm control including collision avoidance and obstacle detection. The paper presents a concept of a control system of unmanned aerial vehicles swarm. The concept is based on local control rules which can be treated as behavior instincts dependent on information received from state of other vehicles. For example when two vehicles from the swarm are flying too close to each other, their desired headings and pitches will be modified to increase the distance between those vehicles. If a vehicle is flying too far away from the swarm, its desired heading and pitch will be also modified to keep the vehicle in the specified range from the swarm gravity center. In situation of obstacle detection a vehicle will try to keep safe distance from it. The swarm control is realized by choosing a swarm leader which can be commanded by an operator via the ground control station. The leader control is precedent control level, which interacts with local control rules through information exchange between vehicles. The paper presents simulation results of swarm flights of three unmanned vehicles based on the proposed concept. They prove the fact that the concept is effective and can be introduced into real UAVs.

Keywords: unmanned aerial vehicles, swarm flight, behavioral control, obstacle avoidance, autonomous control.

1. Wprowadzenie

Sterowanie grupą bezzałogowych obiektów latających (BOL) jest zadaniem złożonym i skomplikowanym, gdyż obejmuje szeroki zakres zagadnień począwszy od implementacji autonomicznego sterowania po warstwę zarządzania celami. Istnieje szereg modeli

prezentujących różne podejścia do sterowania rojem autonomicznych obiektów. Jednak dotychczas nie udało się w pełni uruchomić funkcjonalnych bezzałogowych obiektów latających, które posiadałyby zdolność do lotu w grupie. Większość prezentacji przedstawia jedynie lot w tandemie, czyli co najwyżej dwóch statków powietrznych.

Ważnymi aspektami lotu grupowego jest zagadnienie autonomicznego omijania przeszkód oraz komunikacji radiowej pomiędzy poszczególnymi członkami grupy. Bez zapewnienia tych funkcji nie będzie możliwe stworzenie grupy bezzałogowych obiektów latających, które mogłyby działać wspólnie. Prezentowane w literaturze modele sterowania grupami zakładają, że członkowie grupy są w pełni autonomiczni, stąd też kwestia wyżej wymienionych zagadnień jest pomijana.

Grupa bezzałogowych obiektów latających mogłaby być skutecznie wykorzystana w aplikacjach monitorowania znacznego terenu np. obszarów leśnych i wykrywanie pożarów. Pojedynczy obiekt latający ma ograniczone pole widzenia i patrolowanie znacznego terenu wydłuża czas misji, który z kolei jest ograniczony pojemnością akumulatorów lub zbiornika paliwa. Zastosowanie grupy patrolowej znacznie skraca czas wykonania celu misji oraz oszczędza energię.

2. Struktura systemu sterowania

Zagadnienie autonomicznego lotu grupy BOL można podzielić na następujące zadania, które muszą być realizowane przez system sterowania bezzałogowym obiektem latającym:

1. unikanie kolizji z pozostałymi uczestnikami lotu,
2. omijanie przeszkód,
3. przechwytywanie celów,
4. lot w zadanym kierunku z zadaną prędkością,
5. lot za liderem.

Pierwsze dwa zadania składają się na autonomiczny system sterowania (autopilot), w który powinien być wyposażony każdy uczestnik grupy.

Trzy pozostałe zadania należą już do warstwy zarządzania grupą. Strukturę układu sterowania bezzałogowym obiektem latającym (autopilota) przedstawia rysunek 1.

Autonomiczne unikanie kolizji, omijanie przeszkód oraz autonomiczne sterowanie lotem są procedurami składającymi się na autonomię obiektu latającego i powinny funkcjonować niezależnie od funkcji lotu w grupie. Dopiero, gdy zostaną wdrożone algorytmy autonomicznego sterowania należy skupić się na algorytmie sterowania lotu grupowego.

Zarządzanie misją lotu grupowego powinno być realizowane zarówno lokalnie, jak i centralnie przez stację naziemną GCS. Bowiem stworzenie systemów sztucznej inteligencji, która decydowałaby o misji i celach lotu, a jednocześnie mogłaby być umieszczona na obiekcie latającym jest technologicznie wykluczone. Dodatkowo by zachować redundancję całej grupy, każdy z obiektów musiałby być jednakowo wyposażony i zdolny do samodzielnego decydowania, co oznaczałoby stworzenie rozproszonego systemu decyzyjnego. Z kolei to wymagałoby pewnej, bezpiecznej i znacznej wymiany danych pomiędzy uczestnikami lotu. Zważywszy na dużą podatność komunikacji radiowej na zakłócenia i ograniczenia w przepustowości realizacji rozproszonego systemu decyzyjnego byłoby to utrudnione. Oczywiście za obliczenia musiałby być odpowiedzialny oddzielny procesor, co również podnosi wymagania stawiane zasilaniu i dopuszczalnemu udźwigowi.

Rys. 1. Struktura funkcyjna układu sterowania – autopilota, GCS – stacja naziemna
Fig. 1. Diagram of the control unit – autopilot, GCS – ground control station

Stąd też proponuje się podział warstwy zarządzania grupą na strefy stacji naziemnej i autopilota. Stacja naziemna kontroluje parametry lotu tj. prędkość i wysokość lotu całej grupy, a także kierunek i cel lotu lidera. Z kolei autopilot lokalnie pilnuje by nie doszło do kolizji z innym członkiem grupy lub przeszkodą, a jednocześnie nadzoruje by wszystkie obiekty latające trzymały się wyznaczonego obszaru patrolowego lub lidera, który ma wyznaczony cel. Te funkcje autopilota tworzą warstwę autonomicznego unikania kolizji. Ponadto autopilot powinien realizować lokalne algorytmy autonomicznego sterowania parametrami lotu pojedynczego obiektu latającego, które pełnią rolę elementu wykonawczego względem algorytmów sterowania grupą oraz algorytmów antykolizyjnych. W ten oto sposób system sterowania grupą nosi zarówno cechy systemu zdecentralizowanego, jak i hierarchicznego.

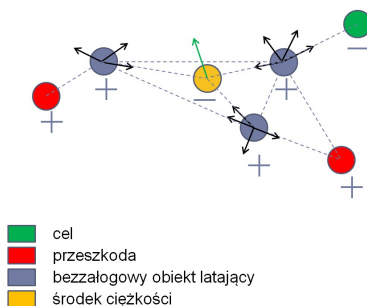
Opisana koncepcja zakłada również, że autonomiczne bezzałogowe obiekty latające potrafią samodzielnie lokalizować przeszkody i są wyposażone w autopiloty, system detekcji przeszkód i inne elementy potrzebne do wzajemnej komunikacji.

3. Algorytm sterowania

Lot grupy bezzałogowych obiektów latających można opisać regułami przyciągania i odpychania – podobnymi do elementarnych zasad zjawisk elektrycznych:

- obiekty o tym samym znaku potencjału – odpychają się,
- obiekty o przeciwnych znakach potencjału – przyciągają się.

W myśl tych zasad – bezzałogowe obiekty latające oraz wszystkie przeszkody posiadają ten sam znak, natomiast cele i środek ciężkości grupy mają znak przeciwny (rys. 2).



Rys. 2. Lot grupy bezzałogowych obiektów latających
Fig. 2. The flight of swarm of unmanned aerial vehicles

W prowadzone pojęcie ciężkości grupy BOL pozwala wprowadzić element sprzęgający członków grupy. Środek ciężkości przyciąga bezzałogowe obiekty latające, ale gdy znajdują się one zbyt blisko zaczynają się odpychać i odległość pomiędzy nimi ustabilizuje

się i przyjmie wartość stałą. W sytuacji, gdy lider przemieszcza się w kierunku zadanego celu, środek ciężkości podąża za nim, a wraz z nim pozostali członkowie grupy. W przypadku, gdy formacja tworzą obiekty latające w układzie płatownca, wówczas prędkość lotu jest zadawana ze stacji naziemnej i jest jednakowa dla wszystkich. Stacja naziemna może jednak kontrolować kierunek lotu lidera. Jeśli natomiast grupę tworzą obiekty posiadające możliwość pionowego startu, stacja naziemna kontroluje jedynie prędkość i kierunek lotu lidera.

Zakłada się następujące reguły sterowania grupą:

- gdy zadanie śledzenia lidera jest aktywne – stacja naziemna kontroluje jedynie lot lidera, tzn. lider przechwytyuje cel, reszta grupy podąża za nim. W przypadku płatownców – stacja naziemna kontroluje jedynie kierunek lotu lidera, a prędkość lotu jest zadawana wszystkim członkom grupy, w przypadku pionowzłotów stacja naziemna kontroluje jedynie prędkość i kierunek lotu lidera.
- gdy zadanie śledzenia lidera jest nieaktywne – stacja naziemna może sterować niezależnie każdym członkiem grupy tj. jego prędkością i kierunkiem,
- przechwytywanie celu jest aktywne na bezzałogowym obiekcie latającym aktualnie sterowanym przez stację naziemną, gdyż w danej chwili może ona komunikować się jedynie z wybranym obiektem latającym.
- zadania antykolizyjne tj. unikanie kolizji zarówno z przeszkodami jak i innymi obiektami latającymi należącymi do grupy są zawsze aktywne.

Obiekt latający jest sterowany przy pomocy wektora prędkości, którego długość jest prędkością lotu, a zwrot i kierunek określają orientację obiektu latającego w przestrzeni oraz zadaną trajektorię lotu. Wynika to z poniższych zależności, które zakładają, że wektor prędkości bezzałogowego obiektu latającego leży zawsze w osi X, równoległe do siły wytwarzanej przez napęd (w przypadku płatownca). Na podstawie wektora prędkości można wyznaczyć wartość prędkość, kąt pochylenia oraz kurs lotu (1).

$$\vec{V} = \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix}$$

$$|\vec{V}| = \sqrt{(V_X^2 + V_Y^2 + V_Z^2)}$$

$$\theta = a \sin \left(\frac{V_Z}{|\vec{V}|} \right); \quad \psi = a \sin \left(\frac{V_Y}{\sqrt{V_X^2 + V_Y^2}} \right) = a \sin \left(\frac{V_Y}{|\vec{V}| \cdot \cos \theta} \right) \quad (1)$$

gdzie: V – wektor prędkości, $|\vec{V}|$ – prędkość lotu, θ – kąt pochylenia pitch, ψ – kurs - heading.

Odwrotną relację przedstawiają zależności (2). Znając prędkość lotu, kąt pochylenia oraz kurs można wyznaczyć współrzędne wektora prędkości.

$$V_X = |\vec{V}| \cdot \cos \theta \cdot \cos \psi \quad V_Y = |\vec{V}| \cdot \cos \theta \cdot \sin \psi \quad V_Z = |\vec{V}| \cdot \sin \theta \quad (2)$$

gdzie: V – wektor prędkości, $|\vec{V}|$ – prędkość lotu, θ – kąt pochylenia pitch, ψ – kurs - heading.

Kurs, kąt pochylenia i prędkość lotu są sygnałami wejściowymi do lokalnego autonomicznego algorytmu sterowania parametrami lotu i są zadawane przez algorytmy nadrzędne tj. antykolizyjne i zarządzania lotem w grupie. Należy, jak już wcześniej wspomniano, rozgraniczyć dwa oddzielne przypadki:

- płatownce – prędkość lotu $|\vec{V}|$ jest jednakowa dla wszystkich obiektów i zadawana bezpośrednio ze stacji naziemnej, zaś wektor prędkości jest potrzebny do wyznaczenia kursu i kąta pochylenia,

- pionowzloty - wektor prędkości określa wszystkie parametry lotu tj. kurs, pochylenie oraz prędkość lotu.

Wektor prędkości jest wyznaczany na podstawie zależności (3) i jest wypadkową prędkości od poszczególnych reguł sterowania.

$$\vec{V} = SF_{AC} \cdot \vec{V}_{AC} + SF_{OB} \cdot \vec{V}_{OB} + (L \cdot F + \bar{F}) \cdot SF_T \cdot \vec{V}_T + F \quad (3)$$

gdzie: SF – współczynniki wagowe, L – funkcja lidera aktywna ($L=1$), F – funkcja lotu w szyku aktywna ($F=1$), V_{AC} – wektor prędkości – unikanie kolizji z BOL, V_{OB} – wektor prędkości – unikanie kolizji z przeszkodą, V_T – wektor prędkości – sterowanie z GCS lub przechwycenie celu, V_{SC} – wektor prędkości – trzymanie szyku.

Współczynniki wagowe SF decydują, jaki priorytet mają poszczególne składowe wypadkowego wektora prędkości, a zatem określają, który algorytm aktualnie kontroluje kierunek lotu. Algorytmy antykolizyjne mają najwyższy priorytet będąc funkcją odległości pomiędzy obiektami latającymi oraz pomiędzy obiektami latającymi i przeszkodami. Niższy priorytet ma algorytm przechwytywania celu lub lotu w zadanym kierunku. Najniższy priorytet ma algorytm zgrupowania się obiektów latających, co znaczy, że środek ciężkości grupy skupia obiekty latające w określonej odległości pomiędzy nimi wykluczającej kolizję i tylko wówczas, gdy nie ma zagrożenia ze strony przeszkody.

Poszczególne składowe wchodzące do wypadkowego wektora prędkości są opisane zależnościami (4) [1]:

$$V_{AVG} = \left| \frac{\vec{V}_{UAV1} + \vec{V}_{UAV2} + \dots + \vec{V}_{UAVn}}{n} \right|$$

$$\vec{V}_{AC} = V_{AVG} \cdot \vec{k}_{AC} \quad \vec{V}_{OB} = V_{AVG} \cdot \vec{k}_{OB} \quad \vec{V}_{SC} = V_{AVG} \cdot \vec{k}$$

$$\vec{V}_T = \begin{cases} \vec{V}_C & SF_{T1} \geq SF_{T2} \\ P \cdot V_{AVG} \cdot \vec{k}_T & SF_{T1} < SF_{T2} \end{cases} \quad (4)$$

gdzie: V_{UAV1} , V_{UAV2} , V_{UAVn} – wektory prędkości poszczególnych BOL, n – ilość BOL w grupie, V_{AVG} – wypadkowa prędkości grupy, V_C – zadany wektor prędkości, k_{AC} , k_{OB} , k_{SC} , k_T – wektory kierunkowe o współrzędnych z zakresu 0-1, SF_{T1} – współczynnik wagowy – lot w zadanym kierunku, SF_{T2} – współczynnik wagowy – lot w kierunku zadanych współrzędnych, P – status przechwylenia.

Wypadkowa prędkość grupy powinna być wyznaczana na podstawie wypadkowych wektorów prędkości wszystkich uczestników grupy w przypadku obiektów latających posiadających możliwość zawisu (V_{avg} może być równa zero), natomiast w przypadku płatowców gdzie przyjęto założenie, że wszystkie obiekty posiadają taką samą prędkość lotu zadaną ogólnie, V_{avg} – jest parametrem kontrolowanym przez stację naziemną.

Algorytm kontrolujący grupę wymaga wyznaczenia środka ciężkości, który jest opisany zależnością (5) [1]:

$$\vec{SC} = \left(\frac{\vec{P}_{UAV1} + \vec{P}_{UAV2} + \dots + \vec{P}_{UAVn}}{n} \right)$$

$$P_{UAVn} = \begin{bmatrix} X_E \\ Y_N \\ h \end{bmatrix} \quad (5)$$

gdzie: P_{UAV1} , P_{UAV2} , P_{UAVn} – wektory aktualnych pozycji BOL w układzie ENU (East North Up), X_E , Y_N – współrzędne, h – wysokość lotu.

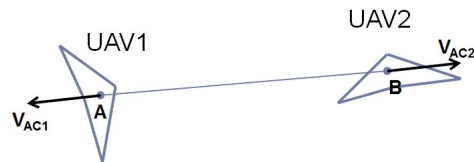
Środek ciężkości jest punktem, wokół którego powinny koncentrować się bezzałogowe obiekty latające, stąd będzie on je przyciągał dopóki nie zostanie to zrównoważone przez algorytm antykolizyjny. Wówczas grupa bezzałogowych obiektów latających pozostanie w stanie równowagi. Aby wyznaczyć współrzędne środka ciężkości każdy członek grupy musi znać współrzędne pozostałych uczestników lotu. Wymusza to zastosowanie nieustannej wymiany informacji pomiędzy wszystkimi bezzałogowymi obiektami latającymi.

Każde z zadań autonomicznego lotu w grupie generuje określoną składową wypadkowego wektora prędkości, co oznacza, że w sposób określony przez współczynnik wagowy również kontroluje trajektorię lotu konkretnego obiektu latającego.

Algorytmy wyznaczania składowych wypadkowego wektora prędkości odpowiedzialnych za poszczególne zadania sterowania zostaną przedstawione począwszy od zadania o najwyższym priorytecie tj. unikania kolizji z innym obiektem latającym.

UNIKANIE KOLIZJI Z INNYM BOL

Algorytm zakłada, że każdy obiekt latający jest w stanie wyznaczyć odległość pomiędzy nim a pozostałymi uczestnikami lotu. Potrzebne więc będą te same informacje, które są niezbędne do wyznaczenia środka ciężkości. Składowa wektora prędkości obliczana tak, aby była ona równoległa do prostej łączącej rozpatrywany obiekt latający z najbliższym uczestnikiem lotu, ponieważ to on stwarza największe zagrożenie kolizją. Składowa wektora jest skierowana w kierunku przeciwnym niż kierunek wyznaczony przez położenie najbliższego obiektu latającego. Jednocześnie prędkość lotu w wyznaczonym kierunku powinna być równa iloczynowi V_{avg} i współczynnika wagowego SF_{AC} , z którym składowa powinna być brana pod uwagę przy wyznaczaniu wypadkowego wektora prędkości. Waga SF_{AC} jest różna od zera jedynie wówczas, gdy obiekty latające zbliżą się na odległość mniejszą niż wartość graniczna. W ten sposób dwa obiekty latające znajdujące się zbyt blisko siebie zostaną od siebie odsunięte, gdyż składowe wektora prędkości dla poszczególnego statku powietrznego będą miały przeciwne zwroty (rys. 3) [1].



Rys. 3. Algorytm unikania kolizji dwóch statków powietrznych, $V_{AC1}=V_{AC2}$ – składowe wektora prędkości odpowiedzialne za odpychanie statków powietrznych odpowiednio dla UAV1 i UAV2, A, B – środki ciężkości bezzałogowych obiektów latających [1]

Fig. 3. The idea of collision avoidance between two aerial vehicles. $V_{AC1}=V_{AC2}$ - elements of velocity vectors responsible for two vehicles repulsion, respectively for UAV1 and UAV2, A,B – center of gravity of unmanned aerial vehicles [1]

Składowa wektora prędkości odpowiedzialna z unikanie kolizji z uczestnikami lotu jest opisana zależnościami [1]:

$$\vec{V}_{AC} = -V_{AVG} \cdot \vec{k}_{AC}$$

$$\vec{k}_{AC} = \frac{1}{|AB|} \cdot \vec{AB} \quad (6)$$

$$\vec{AB} = P_{UAV2} - P_{UAV1}$$

gdzie: AB – wektor łączący środki ciężkości dwóch najbliższych bezzałogowych obiektów latających, V_{AC} – składowa wektora prędkości odpowiedzialna za omijanie uczestników lotu grupowego, V_{AVG} – wypadkowa prędkość grupy, $|AB|$ – odległość pomiędzy dwoma bezzałogowymi obiektami latającymi, P_{UAV1} , P_{UAV2} – współrzędne bezzałogowych obiektów latających, które zbliżyły się do siebie na zbyt niebezpieczną odległość.

Współczynnik wagowy SF_{AC} przyjmuje wartości z przedziału 0-1 i jest opisany zależnością (7):

$$SF_{AC} = k \cdot \sqrt{\frac{D_{SAFE} - |AB|}{D_{SAFE}}} \quad (7)$$

gdzie: $|AB|$ – odległość pomiędzy dwoma bezałogowymi obiektami latającymi, D_{SAFE} – odległość graniczna, poniżej której algorytm unikania kolizji jest aktywny, k – współczynnik.

UNIKANIE KOLIZJI Z PRZESZKODAMI

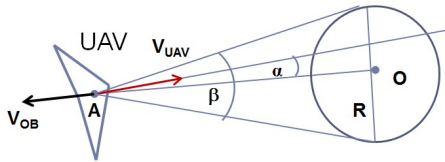
Algorytm omijania przeszkód działa bardzo podobnie jak algorytm unikania kolizji z pozostałymi bezałogowymi obiektami latającymi. Istotnym założeniem jest implementacja algorytmów lokalizujących przeszkodę względem obiektu latającego. Współrzędne najbliższej przeszkody są konieczne do wyznaczenia składowej wektora prędkości (rys. 4).

Algorytm lokalizowania przeszkód ze względu na swoją złożoność i ograniczenia będzie tematem osobnych badań i nie będzie uwzględniany w niniejszym sprawozdaniu.

Składowa wektora prędkości odpowiedzialna za omijanie przeszkód jest opisana zależnością [1]:

$$\vec{V}_{OB} = -V_{AVG} \cdot \vec{k}_{OB} \quad \vec{k}_{OB} = \frac{1}{|AO|} \cdot \vec{AO} \quad \vec{AO} = P_O - P_U \quad (8)$$

gdzie: AO – wektor łączący środek ciężkości obiektu latającego ze środkiem walca reprezentującego zlokalizowaną przeszkodę, V_{OB} – składowa wektora prędkości odpowiedzialna za omijanie przeszkód, V_{AVG} – wypadkowa prędkość grupy, $|AO|$ – odległość pomiędzy bezałogowym obiektem latającym a przeszkodą, P_O – współrzędne zlokalizowanej przeszkody, P_{UAV} – współrzędne bezałogowego obiektu latającego.



Rys. 4. Algorytm omijania przeszkód, V_{OB} – składowa wektora prędkości odpowiedzialna za odpychanie bezałogowego obiektu latającego od zlokalizowanej przeszkody, V_{UAV} – aktualny wektor prędkości, α – pomiędzy aktualnym kierunkiem lotu a kierunkiem wyznaczonym przez przeszkodę, β – kąt stożka obszaru niedozwolonego – kierunki lotu leżące wewnątrz stożka prowadzą do kolizji, O – przeszkoda, A – środek ciężkości bezałogowego obiektu latającego [1]

Fig. 4. The idea of obstacle avoidance, V_{OB} – the element of velocity vector responsible for repulsion of the unmanned aerial vehicle from an obstacle, V_{UAV} – current velocity vector, α – angle between current heading and obstacle sight angle, β – angle of a cone of forbidden area – flight headings placed inside of the cone always create collision paths, O – obstacle, A – center of gravity of unmanned aerial vehicle [1]

Zasadniczą różnicą pomiędzy algorytmem unikania kolizji a algorytmem omijania przeszkód jest sposób wyznaczania współczynnika wagowego SF_{OB} . W przypadku omijania przeszkód, które są reprezentowane przez walec o środku określonym współrzędnymi zlokalizowanej przeszkody i promieniu R wyznaczającym strefę niebezpieczną dla lotu BOL, o współczynniku wagowym oprócz odległości od przeszkody decyduje bieżący kierunek lotu. Jeśli bowiem nawet przeszkoda zostanie zlokalizowana blisko BOL, którego wektor prędkości wyznaczający kierunek lotu leży poza stożkiem stworzonym przez dwie płaszczyzny styczne do walca i przecinające się w środku ciężkości BOL, to przeszkoda nie stwarza niebezpieczeństwa kolizji. Stąd współczynnik wa-

gowy jest nieliniową funkcją dwóch parametrów – odległości BOL od przeszkody oraz kąta pomiędzy aktualnym kierunkiem lotu a kierunkiem wyznaczonym przez przeszkodę. Współczynnik wagowy wyrażony będzie zależnością [1]:

$$SF_{OB} = \begin{cases} 0 & \alpha > \frac{\beta}{2} \\ (1 - SF_{AC}) \cdot k \cdot \sqrt{\frac{D_{SAFE} - |AO|}{D_{SAFE}}} & \alpha \leq \frac{\beta}{2} \end{cases}$$

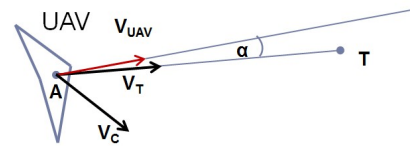
$$\frac{\beta}{2} = a \tan\left(\frac{R}{|AO|}\right) \quad \alpha = a \cos\left(\frac{\vec{V}_{UAV} \circ \vec{AO}}{|\vec{V}_{UAV}| \cdot |\vec{AO}|}\right) \quad (9)$$

gdzie: $|AO|$ – odległość od przeszkody, D_{SAFE} – odległość graniczna, poniżej której algorytm omijania przeszkód jest aktywny, α – kąt pomiędzy aktualnym kierunkiem (kurse) lotu, a kierunkiem na przeszkodę, β – kąt stożka obszaru niedozwolonego, SF_{AC} – współczynnik wagowy algorytmu unikania kolizji z BOL.

Szczególną uwagę należy zwrócić na to, że współczynnik wagowy S_{FC} jest również odwrotną funkcją S_{AC} , co oznacza, że algorytm unikania kolizji z BOL ma większy priorytet. Wynika to z prostego faktu, że przeszkoda jest obiektem nieruchomym i względna prędkość zbliżania się jest dużo niższa niż prędkość zbliżania się dwóch BOL.

PRZECHWYTYWANIE CELU

Algorytm przechwytywania celu składa się z dwóch zagadnień. Pierwszym z nich jest lot w zadanym kierunku, co oznacza, że składowa wektora prędkości jest ustalana ogólnie przez stację naziemną, a współczynnik wagowy jest proporcjonalny do uchybu. Natomiast drugie zagadnienie wiąże się z lotem w kierunku konkretnego celu wyznaczonego współrzędnymi i minimalnym kątem ataku. Cel lotu jest elementem przyciągającym, co oznacza, że składowa wektora prędkości odpowiedzialna za przechwytywanie celów jest skierowana w jego kierunku (rys. 5).



Rys. 5. Algorytm przechwytywania celu, V_{UAV} – aktualny wektor prędkości, V_T – składowa wektora prędkości odpowiedzialna za przechwytywanie celu, V_C – składowa wektora prędkości zadana ze stacji naziemnej, T – cel, A – środek ciężkości bezałogowego obiektu latającego, α – kąt ataku [1]

Fig. 5. The idea of target interception, V_{UAV} – current velocity vector, V_T – the element of velocity vector responsible for target interception, V_C – velocity vector commended from ground station, T – target, A – center of gravity of unmanned aerial vehicle, α – attack angle [1]

Składowa wektora prędkości odpowiedzialna za przechwytywanie celu lub w zadanym kierunku jest opisana zależnością [1]:

$$\vec{V}_T = \begin{cases} \vec{V}_C & SF_{T1} \geq SF_{T2} \\ V_{AVG} \cdot \vec{k}_T & SF_{T1} < SF_{T2} \end{cases} \quad (10)$$

$$\vec{k}_T = \frac{1}{|AT|} \cdot \vec{AT} \quad \vec{AT} = P_T - P_{UAV}$$

Gdzie: AT – wektor łączący środek ciężkości obiektu latającego z punktem określonym przez współrzędne celu, V_T – składowa wektora prędkości odpowiedzialna za przechwytywanie celu,

V_{AVG} – wypadkowa prędkość grupy, V_C – składowa wektora prędkości odpowiedzialna za lot w zadanym kierunku celu, $|AT|$ – odległość pomiędzy bezzałogowym obiektem latającym a przeszkodą, P_T – współrzędne zlokalizowanej przeszkody, P_{UAV} – współrzędne bezzałogowego obiektu latającego, SF_{T1} – współczynnik wagowy składowej wektora prędkości odpowiedzialnej za lot w zadanym kierunku, SF_{T2} – współczynnik wagowy składowej wektora prędkości odpowiedzialnej za przechwycenie celu.

Współczynnik wagowy SF_T określający priorytet algorytmu przechwytywania celu składa się z dwóch składowych SF_{T1} i SF_{T2} , które odpowiednio decydują o wadze podzadania: zadania lotu w zadanym kierunku i zadania przechwycenia celu. Dodatkowo jest on zależny od współczynników wagowych algorytmu unikania kolizji SF_{AC} i omijania przeszkód SF_{OB} . W ten sposób algorytm przechwytywania celu ma niższy priorytet od algorytmów antykolizyjnych. Współczynnik wagowy SF_T jest opisany następującymi zależnościami [1]:

$$SF_{T1} = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{|V_{UAV}| - |V_C|}{|V_C|}\right)^2} & |V_C| \neq 0 \\ 0 & |V_C| = 0 \end{cases}$$

$$SF_{T2} = \begin{cases} 0 & \alpha < \alpha_{desire} \cap P = 1 \\ \frac{1}{e^{\frac{\alpha - \alpha_{desire}}{|AT|}}} & \alpha \geq \alpha_{desire} \cap P = 0 \end{cases}$$

$$\alpha = a \cos\left(\frac{\overrightarrow{V_{UAV}} \cdot \overrightarrow{AT}}{|\overrightarrow{V_{UAV}}| \cdot |\overrightarrow{AT}|}\right)$$

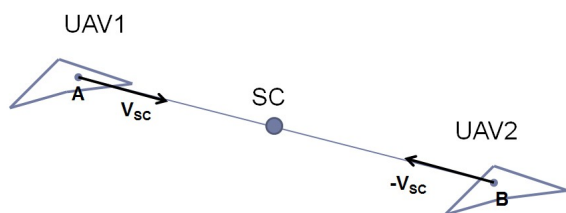
$$SF_T = (1 - SF_{AC} - SF_{OB}) \cdot k \cdot \max(SF_{T1}, SF_{T2}) \quad (11)$$

gdzie: $|AT|$ – odległość od przeszkody, V_{UAV} – aktualny wektor prędkości, V_C – zadany wektor prędkości, a – aktualny kąt ataku, α_{desire} – aktualny kąt ataku, k – współczynnik, P – status przechwycenia, cel przechwycony $P=1$, SF_{AC} – współczynnik wagowy algorytmu unikania kolizji z BOL, SF_{OB} – współczynnik wagowy algorytmu omijania przeszkód, SF_{T1} – współczynnik wagowy algorytmu lotu w zadanym kierunku, SF_{T2} – współczynnik wagowy algorytmu przechwytywania celu.

ALGORYTM ZGRUPOWANIA SIĘ BOL

Algorytm formowania grupy posiada najniższy priorytet. Oznacza to, że środek ciężkości będzie skupiał członków grupy BOL tylko wówczas, gdy żaden z BOL nie będzie zagrożony kolizją z przeszkodą lub innym BOL. Minimalna dopuszczalna odległość pomiędzy BOL lecącymi w grupie jest określona przez D_{SAFE} , gdyż wówczas algorytm unikania kolizji o wyższym priorytecie będzie odpychał BOL od siebie. Grupa BOL znajdzie się w stanie pewnej równowagi.

Algorytm formowania grupy opiera się na wykorzystaniu środka ciężkości całej grupy, jako elementu przyciągającego wszystkie BOL. Stąd też kierunek i zwrot składowej wektora prędkości odpowiedzialnej za zgrupowanie będzie wyznaczony przez środek ciężkości (rys. 6).



Rys. 6. Algorytm formowania grupy, $V_{sc} = -V_{sc}$ – składowe wektora prędkości odpowiedzialne za formowanie grupy odpowiednio dla UAV1 i UAV2,

SC – środek ciężkości grupy BOL, A, B – środki ciężkości bezzałogowych obiektów latających UAV1 i UAV2 [1]

Fig. 6. The idea of swarm formation, $V_{sc} = -V_{sc}$ – elements of velocity vectors, which are responsible for swarm formation, respectively for UAV1 and UAV2, SC – center of gravity of UAV swarm, A, B – center of gravity of unmanned aerial vehicles UAV1 and UAV2 [1]

Składowa wektora prędkości odpowiedzialna za formowanie grupy jest opisana zależnościami [1]:

$$\overrightarrow{V_{SC}} = V_{AVG} \cdot \overrightarrow{k_{SC}} \quad \overrightarrow{k_{SC}} = \frac{1}{|\overrightarrow{ASC}|} \cdot \overrightarrow{ASC} \quad \overrightarrow{ASC} = \overrightarrow{P_{SC}} - \overrightarrow{P_{UAV}} \quad (13)$$

Gdzie: ASC – wektor łączący środek ciężkości obiektu latającego z punktem określonym przez współrzędne środka ciężkości grupy, V_{sc} – składowa wektora prędkości odpowiedzialna za przechwycenie celu, V_{AVG} – składowa wektora prędkości odpowiedzialna za lot w zadanym kierunku celu, $|ASC|$ – odległość pomiędzy bezzałogowym obiektem latającym a środkiem ciężkości, P_{sc} – współrzędne zlokalizowanej przeszkody, P_{UAV} – współrzędne bezzałogowego obiektu latającego.

Ponieważ algorytm grupowania BOL wokół środka ciężkości ma najniższy priorytet, jego współczynnik wagowy SF_{SC} jest jedynie funkcją współczynników wszystkich pozostałych algorytmów [1]:

$$SF_{SC} = 1 - SF_{AC} - SF_{OB} - SF_T \quad (14)$$

gdzie: SF_{sc} – współczynnik wagowy algorytmu formowania grupy, SF_{OB} – współczynnik wagowy algorytmu omijania przeszkód, SF_{AC} – współczynnik wagowy algorytmu unikania kolizji, SF_T – współczynnik wagowy algorytmu przechwytywania celu.

4. Komunikacja radiowa

Istotnym elementem sterowania lotem grupy bezzałogowych obiektów latających jest komunikacja radiowa. Każdy z uczestników lotu powinien być wyposażony w modem radiowy umożliwiający komunikację BOL ze stacją naziemną oraz drugi modem radiowy do komunikacji z pozostałymi BOL. Stąd też konieczny jest dobór odpowiednich urządzeń o parametrach wykluczających wzajemne zakłócanie się.

Ważniejszym problemem jest opracowanie protokołu wymiany danych pomiędzy BOL zapewniającego bezpieczną i pewną komunikację, która jest konieczna do przesyłania parametrów lotu pojedynczego BOL:

- identyfikatora BOL,
- aktualnych współrzędnych położenia,
- aktualnej prędkości lotu,
- aktualnego kursu,
- aktualnego kąta pochylania,
- dodatkowych flag stanu.

Proponowana ramka komunikacyjna z niezbędnymi danymi jest przedstawiona na rysunku 7.

| | | | | | |
|-----------------------|------|------|------|-------|---------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| IDENTYFIKATOR NADAWCY | Xdot | Ydot | Zdot | Pitch | Heading |
| 7 | 8 | 9 | 10 | | |
| Altitude | X | Y | F+L | STOP | |

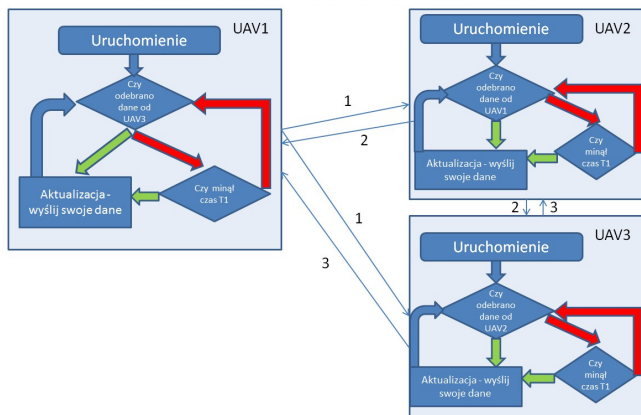
F, L - bity znaczniki
F - formacja, L - lider

Rys. 7. Ramka komunikacyjna z danymi, które powinny być rozsyłane pomiędzy BOL, Xdot, Ydot, Zdot – wskazania pokładowych akcelerometrów, Pitch – kąt pochylania, Heading – kurs, Altitude – wysokość lotu, X, Y – współrzędne geograficzne, L – flaga lidera, F – flaga formowania grupy

Fig. 7. Communication data frame which should be broadcasted between UAVs, Xdot, Ydot, Zdot – current measurement of onboard accelerometers, Pitch – current pitch angle, heading – current heading angle, Altitude – current flight altitude, X, Y – geographical UAV position, L- the leader flag, F- the flag of swarm formation

W przypadku grupy bezzałogowych obiektów latających w układzie płotowca wskazania akcelerometrów można pominąć, gdyż w tym przypadku wyznaczanie prędkości V_{AVG} nie jest potrzebne. Zapobiegnie to sytuacji, gdy $V_{AVG}=0$, co może spowodować rozbieżność BOL. W przypadku pionowzlotów, które posiadają możliwość zawisu wypadkowa prędkość grupy może być równa zero i nie będzie miało to wpływu na bezpieczeństwo lotu.

Kolejnym elementem wymagającym opracowania jest arbitraż komunikacji radiowej pomiędzy BOL. Modemy radiowe będą pracować w trybie rozgłoszeniowym, ale tylko jeden w danym momencie może nadawać – wszystkie pozostałe odbierają. Arbitraż będzie zarządzał komunikacją tak, aby w danej chwili czasowej tylko jeden BOL wysyłał dane. Arbitraż powinien również uwzględniać ewentualną zmianę liczebności grupy na skutek nieprzewidzianych okoliczności np. kolizji. Najprostszym rozwiązaniem jest zaprojektowanie kolejki nadawania, która jest zabezpieczona limitami czasowymi na wypadek wypadnięcia z kolejki pojedynczego BOL. Nadawanie w kolejce będzie odbywało się zgodnie z wartościami identyfikatorów BOL, i BOL będzie nadawał tylko wówczas, gdy dane z BOL o niższym identyfikatorze lub z końca kolejki zostaną prawidłowo odebrane lub po upływie ściśle określonego limitu czasowego. Wówczas jeśli nawet bezzałogowy obiekt nie odbierze danych od poprzednika (np. z powodu jego awarii), to i tak wyśle swoje dane z opóźnieniem. Pozwoli to kontynuować komunikację i kolejni uczestnicy grupy będą mogli przesłać swoje dane. Schemat proponowanego arbitrażu komunikacji radiowej w grupie jest przedstawiony na rys. 8.



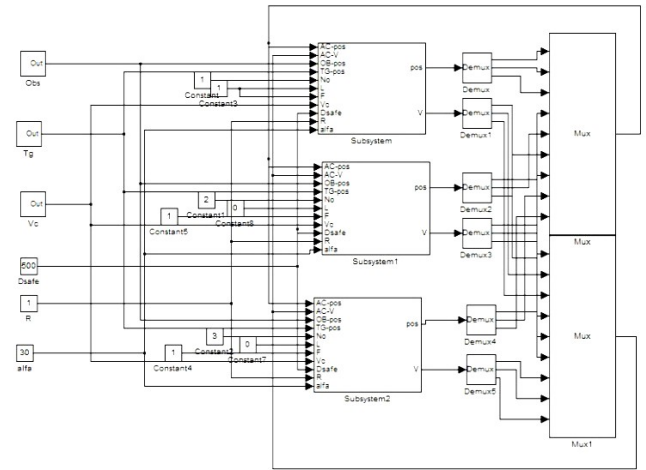
Rys. 8. Proponowany sposób komunikacji z arbitrażem w postaci kolejki na przykładzie grupy trzech bezzałogowych obiektów latających
Fig. 8. Example of communication between three unmanned aerial vehicles realized as arbitrated transmission queue.

5. Badania symulacyjne

Aby zweryfikować przydatność zaprezentowanego algorytmu sterowania grupą bezzałogowych obiektów latających przygotowano model symulacyjny w środowisku MATLAB-SIMULINK. Opracowany model jest oparty na grupie 3 BOL. Model nie uwzględnia algorytmów lokalizacji przeszkód, lokalnych algorytmów sterowania BOL oraz komunikacji radiowej. Celem badań symulacyjnych jest sprawdzenie jak zachowują się w sytuacjach krytycznych bezzałogowe obiekty latające tworzące grupę. Bezzałogowe obiekty latające tworzące modelowaną grupę są w układzie płotowca.

Symulacja uwzględnia maksymalnie 3 przeszkody i pojedynczy cel. Ponadto każdy BOL ma przypisany numer porządkowy i każ-

dy BOL może być liderem i tylko wówczas można kontrolować jego kierunek lotu. Prędkość lotu jest jednakowa dla wszystkich BOL, jest ona zadawana, jako parametr symulacji. Model grupy trzech bezzałogowych obiektów latających jest przedstawiony na rys. 9.



Rys. 9. Model symulacyjny grupy trzech bezzałogowych obiektów latających
Fig. 9. The simulation model of swarm of three unmanned aerial vehicles

Przeprowadzono symulacje przedstawiające różne scenariusze lotu bezzałogowych obiektów latających w układzie płotowca:

- lot grupy bez lidera bez uwzględniania przeszkód i celów,
- lot grupy z liderem, któremu zadano trajektorię lotu, bez uwzględniania przeszkód,
- lot grupy z liderem, któremu zadano trajektorię lotu, z uwzględnieniem przeszkód,
- lot grupy z liderem, któremu zadano cel lotu, z uwzględnieniem przeszkód.

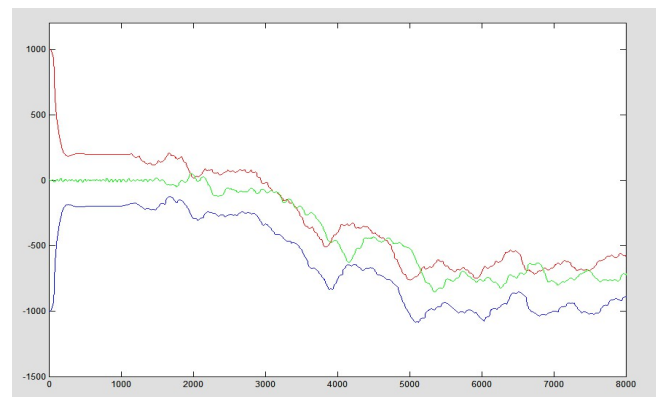
Punkty startowe wszystkich trzech bezzałogowych obiektów latających w każdym z przypadków były niezmiennie. Również początkowy kurs i kąt pochylenia były identyczne i równe zero. Obiekty poruszały się ze stałą prędkości lotu 10 m/s. Bezpieczna odległość pomiędzy bezzałogowymi obiektami latającymi D_{SAFE} została ustalona na 500 m.

Współrzędne początkowe są następujące:

- BOL1 – (0,1000,100),
- BOL2 – (0,0,100),
- BOL3 – (0,-1000,100).

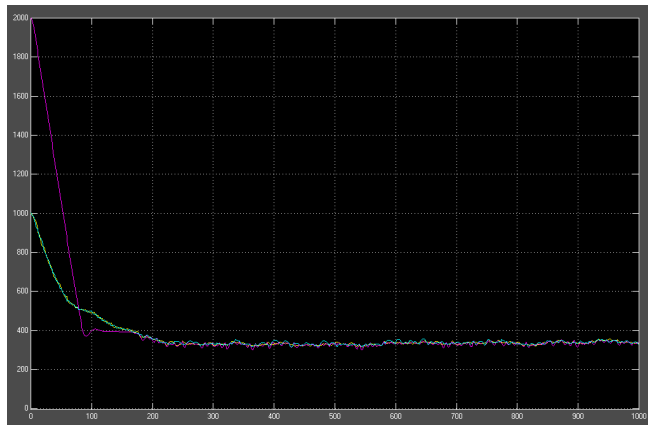
Podczas symulacji nie uwzględniano zmiany wysokości, dlatego też trajektorie będą zaprezentowane w postaci wykresów 2D.

Rys. 10 przedstawia trajektorie lotu uzyskane z symulacji pierwszego przypadku – lotu grupy bez wyszczególnionego lidera, kierunku i celu lotu. Wszystkie BOL poruszają się zgodnie z początkowym kursem. Na rysunku 11 zaprezentowano wykresy dystansu pomiędzy poszczególnymi BOL, gdyż przecięcie się trajektorii lotu nie oznacza jeszcze kolizji.



Rys. 10. Trajektorie lotu grupy BOL bez lidera, celu oraz przeszkód

Fig. 10. Flight paths of UAV swarm without enabled leader and without any target and any obstacle

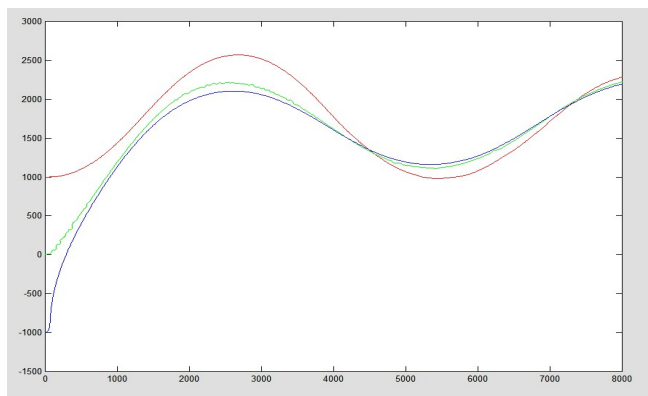


Rys. 11. Wykresy dystansów pomiędzy członkami grupy BOL podczas lotu z rys. 10

Fig. 11. The plot of current distances between all UAVs during the flight from Fig. 10

Rys. 12 przedstawia z kolei lot grupy BOL z wyszczególnionym liderem, któremu zadano trajektorię lotu zgodnie z zależnością:

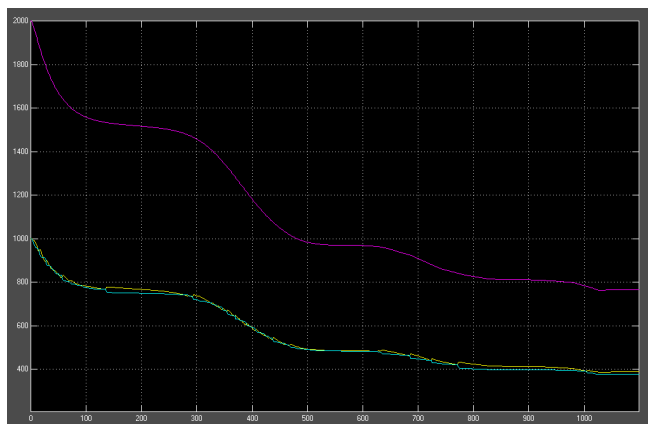
$$V_C = \begin{bmatrix} 5 \\ 5 \cdot \sin(0.01 \cdot \pi) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$



Rys. 12. Trajektorie lotu grupy BOL z liderem (linia czerwona), bez wyznaczonego celu i przeszkód

Fig. 12. Flight paths of UAV swarm, with enabled leader (red line) and without any target and any obstacle

Rys. 13 przedstawia dystanse pomiędzy poszczególnymi BOL w grupie.



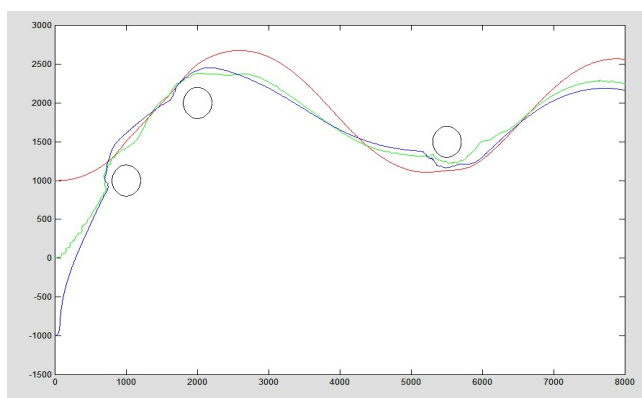
Rys. 13. Wykresy dystansów pomiędzy członkami grupy BOL podczas lotu z rysunku 12

Fig. 13. The plot of current distances between all UAVs during the flight from Fig. 12

Kolejna symulacja, której wyników trajektorie lotu są przedstawione na rysunku 14, uwzględniała trzy przeszkody o następujących współrzędnych:

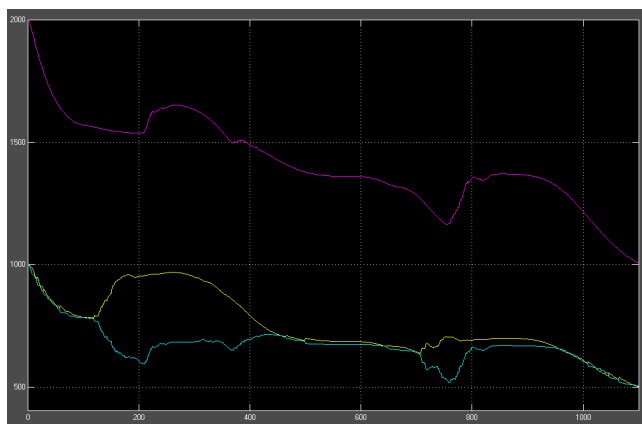
- (1000, 1000, 100),
- (2000, 2000, 100),
- (5500, 1500, 100),

Współrzędne przeszkód zostały tak dobrane by leżały w płaszczyźnie lotu grupy BOL. Promień strefy bezpieczeństwa wokół przeszkód został ustalony na 100 m. Na rysunku 14 przeszkody są przedstawione w postaci okręgów. Rysunek 15 przedstawia dystanse pomiędzy BOL, a rysunek 16 dystanse poszczególnych BOL od przeszkód.



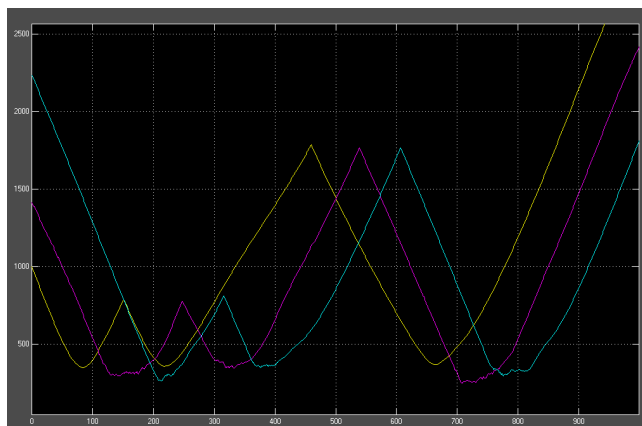
Rys. 14. Trajektorie lotu grupy BOL z liderem (kolor czerwony), bez wyznaczonego celu i z trzema przeszkodami

Fig. 14. Flight paths of UAV swarm with enabled leader (red line), including three obstacles (ellipses) and without any target



Rys. 15. Wykresy dystansów pomiędzy członkami grupy BOL podczas lotu z rysunku 14

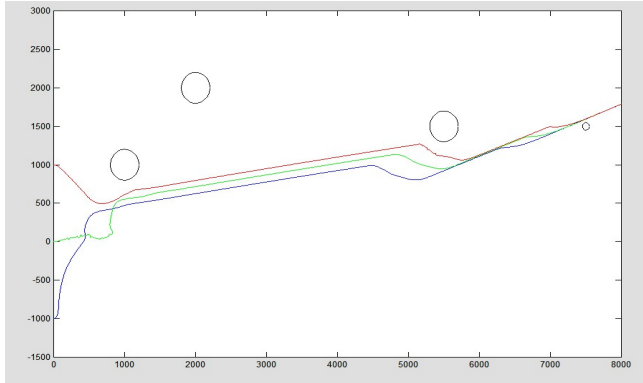
Fig. 15. The plot of current distances between all UAVs during the flight from Fig. 14



Rys. 16. Wykresy dystansów pomiędzy przeszkodami a członkami grupy BOL podczas lotu z rysunku 13

Fig. 16. The plot of current distances between UAVs and the nearest obstacle during the flight from Fig. 13

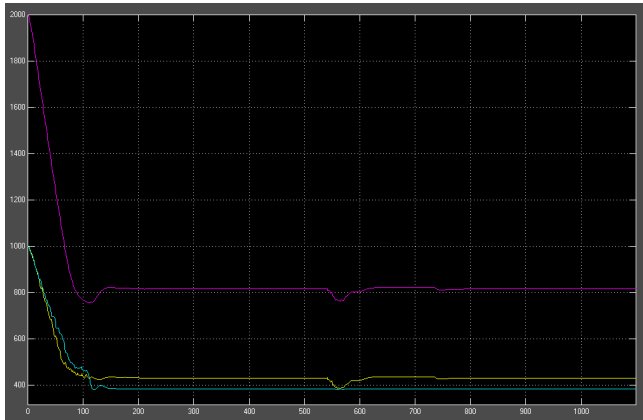
Ostatni przypadek uwzględnia cel lotu lidera, którym jest punkt o współrzędnych (7500,1500,100). Położenie przeszkód jest identyczne jak poprzednio. Trajektorie lotu poszczególnych BOL są przedstawione na rysunku 17. Cel lotu jest reprezentowany przez mały okrąg, zaś przeszkody przez trzy większe.



Rys. 17. Trajektorie lotu grupy BOL z liderem (kolor czerwony), z wyznaczonym celem lotu i z trzema przeszkodami

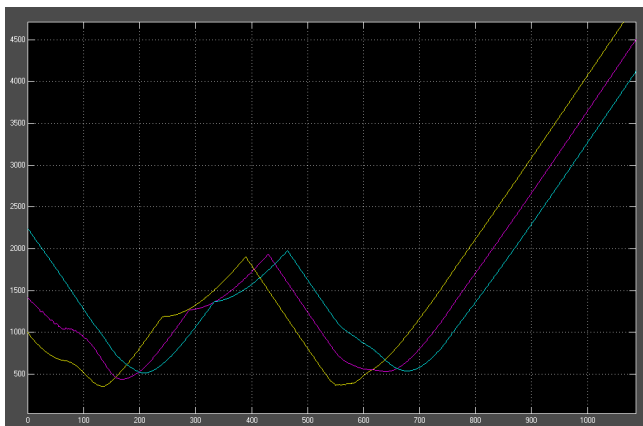
Fig. 17. Flight paths of UAV swarm with enabled leader (red line), including three obstacles (big ellipses) and one target (small ellipse)

Wykresy odległości pomiędzy BOL oraz pomiędzy BOL a przeszkodami są przedstawione kolejno na rysunkach 18 i 19.



Rys. 18. Wykresy dystansów pomiędzy członkami grupy BOL podczas lotu z rysunku 17

Fig. 18. The plot of current distances between all UAVs during the flight from Fig. 17



Rys. 19. Wykresy dystansów pomiędzy przeszkodami a członkami grupy BOL podczas lotu z rysunku 17

Fig. 19. The plot of current distances between UAVs and the nearest obstacle during the flight from Fig. 17

6. Podsumowanie

Zaprezentowane wyniki symulacji lotu grupy trzech bezzałogowych obiektów latających pozwalają stwierdzić, że zaprezentowana koncepcja sterowania lotem grupy BOL może być wykorzystana do budowy rzeczywistej grupy BOL w oparciu o dostępny sprzęt i technologię. W każdym z przypadków BOL lecą w zwartej formacji w odległości od siebie nie mniejszej niż około 400. Jest to wartość mniejsza niż D_{SAFE} , ale należy pamiętać, że poniżej tej wartości jest również aktywny algorytm antykolizyjny, który zaczyna równoważyć przyciąganie środka ciężkości. Stąd 400 m jest wartością, dla której ustaliła się równowaga pomiędzy przyciąganiem środka ciężkości a odpychaniem się BOL. Należy również zaznaczyć, że pomimo faktu, że przedstawione trajektorie przecinają się, to bezpieczny dystans jest utrzymany, co potwierdzają rysunki 11, 13, 15 i 18. Bowiem jeśli trajektorie przecinają się, to BOL znajdują się już w dwóch różnych punktach leżących wokół punktu przecięcia się i oddalonych od siebie o bezpieczny dystans.

Rysunki 14 i 17 przedstawiają trajektorie lotu grupy BOL pomiędzy trzema przeszkodami. Omijanie przeszkód przebiegało bezkolizyjnie zarówno, gdy był zadany kierunek lotu, jak i cel lotu. Wynika to z wyższego priorytetu algorytmu omijania przeszkód.

Zaprezentowane wyniki pozwalają sądzić, że przedstawiona koncepcja pozwoli zbudować grupę rzeczywistych BOL, które będą w stanie realizować misję lotu grupowego zachowując przy tym wysoki poziom bezpieczeństwa. Konieczne są jednakże dalsze badania uwzględniające dynamikę bezzałogowych obiektów latających oraz różną konfigurację przeszkód, celów oraz parametrów lotu grupy. Istnieje, bowiem ryzyko, że w szczególnym przypadku, gdy wszystkie składowe wektora prędkości z uwzględnieniem współczynników wagowych tak się zrównoważą, że BOL nie będzie w stanie uniknąć kolizji, np. gdy BOL lecący pomiędzy dwoma innymi wykryje przeszkodę leżącą na jego trajektorii lotu. Wówczas składowa wektora prędkości od algorytmu unikania kolizji może zrównoważyć składową od algorytmu omijania przeszkód i kolizja z przeszkodą będzie prawdopodobna.

7. Literatura

- [1] Anderson M., Robbins D.: Formation Flight as a Cooperative Game, AIAA-98-4124, AIAA GNC, 1998.
- [2] Tucker Balch and Arkin Ronald C.: Behavior-based Formation Control for Multi-robot Teams. IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 14, (2007), 926-939.
- [3] Chen G., Lewis F.L.: Leader-following control for multiple inertial agents. Int. J. Robust Nonlinear Control (2010), online.
- [4] Anderson B., Fidan B., Yu Ch., Walle D.: UAV Formation Control: Theory and Application. Recent Advances in Learning and Control Lecture Notes in Control and Information Sciences, 2008, Vol. 371/2008, 15-33.
- [5] Xiaohua, W., Yadav V., Balakrishnan S.N.: Cooperative UAV Formation Flying With Obstacle/Collision Avoidance. Control Systems Technology, IEEE Trans. on, 15 Issue:4, 2007, 672 – 679.
- [6] Shao J., Xie G., Wang L.: Leader-following formation control of multiple mobile vehicles. IET Control Theory and Appl., vol. 1, pp. 545-552.
- [7] Drake S., Brown K., Fazackerley J., Finn A.: Autonomous control of multiple uavs for the passive location of radars. Tech. report, Defence Science and Technology Organisation, 2005, pp. 403-409.
- [8] Anderson B., Dasgupta S., Yu C.: Control of directed formations with leader-follower structure. To appear in IEEE Conf. on Decision and Control, 2007.
- [9] Sandeep S., Fidan B., Yu C.: Decentralized cohesive motion control of multi-agent formations. Proc. 14th Mediterranean Conf. on Control and Automation, June 2006.

otrzymano / received: 11.03.2011

przyjęto do druku / accepted: 02.07.2012

artykuł recenzowany / revised paper