

# Manewr omijania zagregowanej grupy przeszkód poruszających się w otoczeniu samolotu

Jerzy Graffstein

Centrum Technologii Kosmicznych, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa, Aleja Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa

**Streszczenie:** Sukces uniknięcia kolizji z ruchomymi przeszkodami zależy od rozwiązania najistotniejszych problemów takich jak: szybkie wykrycie przeszkód, sprawdzenie czy stanowią zagrożenie oraz podjęcie właściwej decyzji o sposobie ich ominięcia. Do podjęcia tej decyzji niezbędna jest właściwa identyfikacja rodzaju zagrożenia, w tym między innymi czy wykryte przeszkody należy potraktować jako jedną zagregowaną grupę. Do typowych przypadków zalicza się agregację ruchomych przeszkód poruszających się blisko siebie. Opisano sytuacje, gdy dołączeniu do grupy podlegają obiekty przemieszczające się w większej odległości od siebie. Zaprezentowano algorytm podejmowania decyzji przypisania (zagregowania) ruchomych przeszkód do danej grupy. Przedstawiono sposób wyliczania jej charakterystycznych parametrów. Omawiane zagadnienia zostały zilustrowane wynikami symulacji manewrów omijania zagregowanej grupy ruchomych przeszkód dla wybranych scenariuszy.

**Słowa kluczowe:** unikanie kolizji, manewr uniku, automatyczne sterowanie lotem, komputerowa symulacja lotu

## 1. Wprowadzenie

Istnieje wiele różnych szczególnie niebezpiecznych scenariuszy zagrożenia wystąpienia kolizji z ruchomymi przeszkodami, wśród których należy wymienić m.in.: brak możliwości przewidzenia ruchu przeszkód, zbyt późne wykrycie potencjalnego zagrożenia związane między innymi i ograniczonymi możliwościami technicznymi detektorów przeszkód [1] oraz występowanie przeszkód przemieszczających się blisko siebie w grupie. Ten ostatni przypadek zagrożenia bezpieczeństwa lotu samolotu będzie rozważany w obecnej pracy. Jednym z problemów, jakie występują w takiej sytuacji, jest często brak możliwości wyznaczenia trajektorii manewru omijania przechodzącej między wspomnianymi przeszkodami. Dotyczy to szczególnie sytuacji, gdy przeszkody przemieszczają się blisko siebie. W związku z tym takie przeszkody należy potraktować jako jedną grupę stanowiącą przeszkodę zastępczą, która będzie charakteryzowała się parametrami analogicznymi jak pojedyncza przeszkoda. W dalszej części pracy zostanie opisana propozycja sposobu podejmowania decyzji o włączeniu przeszkody do wybranej grupy. Zostanie podany algorytm i zależności służące do wyliczenia charakterystycznych parametrów zagregowanej grupy. Wśród nich występuje m.in. promień zastępczej przeszkody, który

w wielu wypadkach może stanowić poważny problem w czasie wykonywania manewru omijania wspomnianej grupy. Przyczyną napotykanymi trudności jest zmienna wartość tego promienia w funkcji czasu spowodowana różnicami między prędkościami przemieszczania się poszczególnych przeszkód tworzących grupę. W dalszej części pracy będzie zasygnalizowana sytuacja, w której przeszkoda poruszająca się w większej odległości od pozostałych (od całej zagregowanej grupy) może stwarzać dodatkowe zagrożenie podczas manewru antykolizyjnego. Z tego powodu, jeśli rozpatrywana przeszkoda spełnia dodatkowe, podane dalej wymagania, zostaje zagregowana z innymi przeszkodami.

## 2. Przyjęte założenia i wybrane definicje w relacji samolot – przeszkoda

W powszechnie spotykanych warunkach, jakie występują podczas lotów samolotów pasażerskich, mogą powstawać zagrożenia kolizji rozwiązywane na drodze decyzji pilotów i poleceń uzyskanych od obsługi naziemnej kontroli ruchu lotniczego [5, 8, 11]. Biorąc pod uwagę sytuacje, w których nie ma na pokładzie samolotu pilota i nie jest możliwa łączność z naziemną kontrolą przyjęto odmienne podejście uwzględniające podane w poprzednim rozdziale założenia. Polega ono na automatyzacji przygotowania wszelkich niezbędnych danych i automatycznym podjęciu decyzji o sposobie znalezienia rozwiązania [3, 6, 7, 10]. Ocena bieżącej sytuacji zagrożenia wystąpienia kolizji z ruchomymi przeszkodami opiera się na sformułowanym w pracach [2, 4] odpowiednim kryterium. Prezentowany sposób określania manewru omijania nie obejmuje swoim zakresem zagadnienia ucieczki przed pogonią, jak również działań celowo utrudniających uniknięcie kolizji.

W pracy przyjęto założenia omijania ruchomych przeszkód: – wykrywanie przeszkód i ich omijanie odbywa się tylko w przedniej półpłaszczyźnie,

### Autor korespondujący:

Jerzy Graffstein, jerzy.graffstein@ilot.edu.pl

### Artykuł recenzowany

nadesłany 29.11.2020 r., przyjęty do druku 28.01.2020 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

- znane są wielkości przeszkód, chwilowe położenia i bieżące parametry ich ruchu,
- przeszkody poruszają się ze stałym modulem i stałym kątem wektora prędkości,
- uniknięcie kolizji i jej ominięcie odbywa się bez negocjacji z innymi ruchomymi obiektami,
- nie są rozważane przepisy w ruchu lotniczym,
- manewr omijania odbywa się w płaszczyźnie poziomej.

W dalszej części tego rozdziału zostaną podane podstawowe, matematyczne zależności opisujące wybrane zmienne [3, 4, 9] pokazane na rys. 1 dla samolotu i przeszkody. Kąty stycznych do okręgu o promieniu  $r_{CMB}$  wynoszą:

$$\rho_1, \rho_2 = \beta_{SP} \pm \arcsin(r_{CMB}/r_{SP}) \quad (1)$$

gdzie  $\beta_{SP}$  kąt patrzenia opisuje zależność:

$$\beta_{SP} = \arctg[(y_{1P} - y_{1S})/(x_{1P} - x_{1S})] \quad (2)$$

oraz dodatkowa zależność tego kąta:

$$\beta_{SPi} = 2\beta_{0i} \quad (3)$$

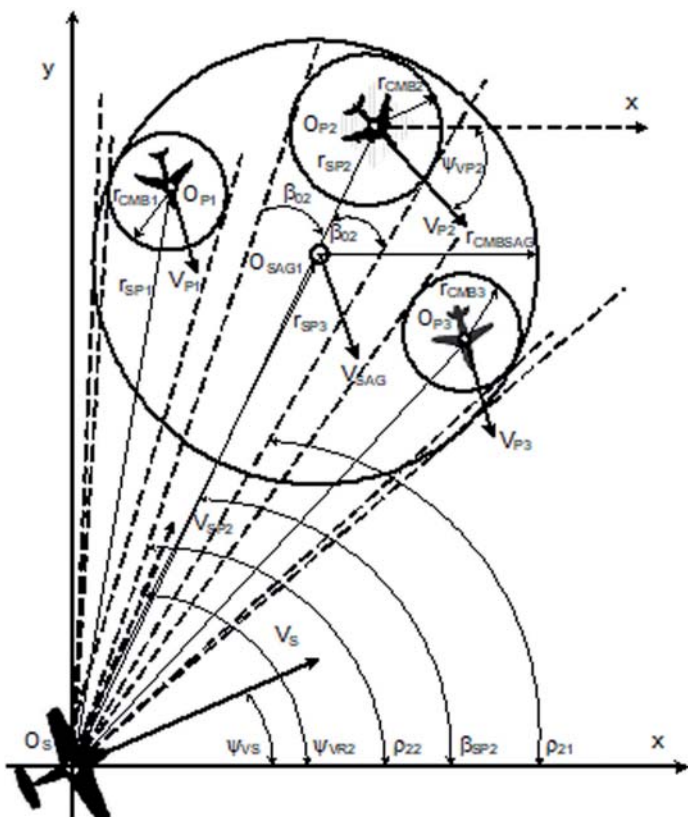
Odległość między obiektami:

$$r_{SP} = \sqrt{(x_{1P} - x_{1S})^2 + (y_{1P} - y_{1S})^2} \quad (4)$$

Kąt wektora prędkości wypadkowej (samolotu i przeszkody) wynosi:

$$\Psi_{VR} = \arctg((\dot{y}_{1S} + \dot{y}_{1P})/(\dot{x}_{1S} + \dot{x}_{1P})) \quad (5)$$

Okrąg o promieniu  $r_{CMB}$  jest hipotetyczną figurą reprezentującą przeszkodę lub grupę przeszkód z charakterystycznym wymiarem stanowiącym sumę maksymalnego wymiaru samolotu, przeszkody i marginesu bezpieczeństwa [3, 4].



Rys. 1. Zmienne opisujące układ samolot – zagregowane przeszkody  
Fig. 1. The Variables describing the aircraft – aggregated obstacles

### 3. Sposób agregacja przeszkód – tworzenie grupy i jej charakterystyczne parametry

W celu uzyskania większej efektywności projektowania samego manewru antykolizyjnego, a w szczególności jego drugiej fazy (omijania) proponuje się tworzenie zastępczej przeszkody w kształcie okręgu, w którym wpisane są w sposób geometryczny wszystkie przeszkody zakwalifikowane do tej samej grupy. Dotyczy to przede wszystkim przeszkód znajdujących się blisko siebie. Przynależność do danej grupy przeszkód jest uzależniona od spełnienia następujących kryteriów:

1. **Warunek 1. (W1)** Odległość między przeszkodami jest mniejsza niż przyjęta wartość (np. odniesiona do promienia  $r_{CMBi}$ )  $r_{PiPj} < \epsilon_{xy}$ , gdzie:

$$r_{PiPj} = \sqrt{(x_{1P} - x_{1P'})^2 + (y_{1P} - y_{1P'})^2} \quad (6)$$

gdzie:  $\epsilon_{xy}$  – maksymalna odległość między kolejnymi parami przeszkód klasyfikująca je do zagregowanej grupy (przykładowo można przyjąć  $\epsilon_{xy} = 3r_{CMB}$ ).

2. **Warunek 2. (W2)** Podobieństwo wektora prędkości (co do modułu i kierunku) wszystkich przeszkód w danej grupie:

$$|\Psi_{Si} - \Psi_{Sj}| < \epsilon_{\psi} \wedge |V_{Si} - V_{Sj}| < \epsilon_v \quad (7)$$

gdzie:  $\epsilon_{\psi}$  i  $\epsilon_v$  – maksymalna różnica kątów wektorów prędkości oraz maksymalna różnica modułów prędkości między kolejnymi parami przeszkód.

3. **Warunek 3. (W3)** Występowanie wspólnych części trójkątów  $O_{st}A_iB_i$  utworzonych ze stycznych zgodnie z rys. 1:

$$\rho_{1j} > \rho_{1i} \wedge \rho_{1j} < \rho_{2i} \vee \rho_{2j} > \rho_{1i} \wedge \rho_{2j} < \rho_{2i} \quad (8)$$

4. **Warunek 4. (W4)** Gdy w danej parze przeszkód nie ma wspólnej części (jak w W3) sprawdzane są kąty najbliższych boków trójkątów  $O_{st}A_iB_i$  tworzące kąty (w układzie współrzędnych rys. 1) spełniające nierówności:

$$|\rho_{2j} - \rho_{1i}| < \epsilon_p \vee |\rho_{1j} - \rho_{2i}| < \epsilon_p \quad (9)$$

gdzie:  $\epsilon_p$  – wielkość kątowa o małej wartości przyjmowana empirycznie (związana m.in. z dokładnościami pomiarów wielkości geometrycznych i kinematycznych).

5. **Warunek 5. (W5)** Wzajemne usytuowanie znacznie oddalonych przeszkód  $P_i$  oraz  $P_j$  a także szybkie zbliżanie się przeszkody  $P_j$  do  $P_i$ :

$$V_{Sj} \gg V_{Si} \wedge r_{SPj} > r_{SPi} \wedge \dot{r}_{PiPj} \ll 0 \quad (10)$$

Najczęściej spotykane są sytuacje, w których obiekty lecące w grupie mają podobne wymiary geometryczne. Przy tworzeniu zastępczej przeszkody nie jest stawiane wymaganie dotyczące podobieństwa kształtów lub wymiarów poszczególnych przeszkód. Istotne są odległości między nimi i podobieństwo ich wektorów prędkości. Różnice prędkości (co do modułów i kierunków) przeszkód w danej grupie mogą powodować zmianę wielkości promienia okręgu oraz inne przemieszczanie się środka zastępczego koła niż to wynika z przyjętej średniej prędkości dla zagregowanej grupy przeszkód. Gdy mamy do czynienia ze spadkiem wartości wspomnianego promienia, to ze względu na bezpieczeństwo możliwe jest przyjęcie jego stałej wartości równej wartości początkowej. Gdy wzrost promienia jest nieznaczny można przyjąć stałą wartość równą maksymalnej, jaką osiągnie zastępczy okrąg w trakcie procedury omijania danej grupy przeszkód. Bardziej efektywnym podejściem jest wyli-

czanie na bieżąco zmieniającej się wartości promienia okręgu dla zastępczej przeszkody. Jego wartość  $r_{CMBAG}$  można opisać następującą zależnością:

$$r_{CMBAG} = \frac{1}{2} \left( \max_{i,j} \left| \sqrt{(x_{1P} - x_{1P'})^2 + (y_{1P} - y_{1P'})^2} \right| \right) + r_{CMBi} + r_{CMBj} \quad (11)$$

oraz położenie współrzędnych  $[x_{SAG}, y_{SAG}]$  środka zastępczego okręgu zagregowanej grupy opisują zależność:

$$[x_{SAG}, y_{SAG}] = [x_{1Pi} \pm (x_{1Pi} - x_{1Pj})/2, y_{1Pi} \pm (y_{1Pi} - y_{1Pj})/2] \quad (12)$$

gdzie plus przed nawiasem jest dla  $x_{1Pi} < x_{1Pj}$  a minus dla  $x_{1Pi} > x_{1Pj}$  i analogicznie dla współrzędnej  $y$ .

Zależność (12) można wykorzystać do wyznaczenia prędkości zmiany położenia środka zagregowanej grupy poprzez zróżniczkowanie współrzędnych środka. W ten sposób wyznaczona wartość jest bliska, ale nie jest równa wypadkowej prędkości przeszkody  $i$ -tej i przeszkody  $j$ -tej, które występują w zależności (11). Jednocześnie może się różnić od wypadkowej prędkością wszystkich przeszkód znajdujących się w danej grupie. Dodatkowo należy zauważyć, że istnieją sytuacje, w których następuje skokowa zmiana położenia środka zagregowanej grupy. Może to wystąpić, gdy zmieni się para przeszkód, według której liczony jest środek, czyli we wzorze (11) zmieni się wartość indeksu  $i$  lub  $j$  albo obu indeksów jednocześnie.

Podjęcie decyzji o przynależności do zagregowanej grupy przeszkód jest złożonym zadaniem. Wymaga umiejętnej analizy wspomnianych kryteriów i ich wzajemnych relacji. Istotnym zagadnieniem jest oszacowanie na drodze np. eksperymentalnej wielkości typu:  $\varepsilon_{\psi}$ ,  $\varepsilon_{\varphi}$  i  $\varepsilon_r$  oraz  $\varepsilon_p$  użytych w podanych pierwszych czterech warunkach (6)–(9). Na wartości tych parametrów mają wpływ wymiary samolotu i przeszkód, a także prędkości poruszania się tych obiektów oraz liczba przeszkód występujących w najbliższym otoczeniu samolotu. Na obecnym etapie trudno jest wyodrębnić ściśle określoną grupę wskazań pozwalających na jednoznaczne określenie omawianych parametrów.

Niezbędny jest kompromis między wielkością okręgu zawierającego zagregowaną grupę przeszkód, a złożonością manewru omijania. Nieprzyłączenie do grupy jednej przeszkody może spowodować, że grupa ta będzie miała mniejszy promień okręgu. Jednocześnie może spowodować, że niezbędne będzie wykonanie dwóch po sobie następujących manewrów. Gdy niewłączenia do grupy przeszkoda  $P_k$  jest w dużo większej odległości od samolotu niż pozostała zagregowana grupa, to w pierwszej kolejności następuje uniknięcie kolizji z grupą, a w drugiej z oddzielną przeszkodą. Zdecydowaną przesłanką do włączenia tej przeszkody  $P_k$  jest po pierwsze spełnienie W3 lub W4. Po drugie jest nią jej prędkość, która powoduje szybkie zbliżanie do rozważanej grupy (prawdziwe W5). To spowoduje, że początkowy duży promień zagregowanej grupy będzie szybko zmniejszać się z upływem czasu. Jednocześnie wyeliminuje konieczność wykonania drugiego manewru ominięcia przeszkody  $P_k$  obciążonego dużym ryzykiem kolizji lub brakiem zachowania założonego marginesu bezpieczeństwa.

Istnieje wiele możliwych scenariuszy dotyczących agregacji przeszkód i dlatego w dalszej części pracy zostaną opisane wyniki dla kilku wybranych, typowych przypadków.

Spełnienie kryteriów W1 oraz W3 lub W4 jest sprawdzane rozłącznie. Oznacza to, że nie każda przeszkoda z każdą muszą je spełniać, a wystarczy, że każda z przeszkód spełnia przynajmniej z jedną. Odwrotna sytuacja jest z W2, który powinien być spełniony wzajemnie przez wszystkie przeszkody między sobą. Podstawowym kryterium dołączenia wybranej przeszkody do zastępczej przeszkody jest W1 i W2. Gdy nie są one spełnione, ale potwierdzony został W3 lub W4 to niezbędna jest analiza wektora prędkości wybranej przeszkody i wektora zagregowanych przeszkód.

## 4. Sposób wyliczania parametrów manewru omijania

Manewr ominięcia ruchomej przeszkody składa się z fazy antykolizyjnej oraz manewru powrotu do lotu wzdłuż zaplanowanej trasy. Pierwsza faza ma na celu uniknięcie niebezpieczeństwa bezpośredniej kolizji z wybraną przeszkodą (lub zagregowaną grupą). W związku z możliwością pojawienia się nowego niebezpieczeństwa w czasie jej trwania istnieje prawdopodobieństwo przedłużenia tej fazy. Z tego samego powodu faza powrotu do lotu po zaplanowanej trasie może zostać w każdej chwili przerwana i będzie ponownie uruchamiany manewr antykolizyjny. W dalszej części pracy zostaną sformułowane kryteria mające na celu określenie początek i koniec wymienionych faz oraz parametry manewrów.

Przyjęto, że odległość  $r_{SPi}$  wymagająca natychmiastowego rozpoczęcia manewru to taka, dla której potrzebny czas na wykonanie zakrętu jest mniejszy niż czas, w jakim samolot zbliży się do przeszkody na odległość  $r_{CMBi}$ . Manewr antykolizyjny powinien zostać uruchomiony przed momentem, w którym spełniony zostanie warunek:

$$r_{SPi} < V_{SPBi} / (\omega_{Zakls} / \rho_{2i} - \Psi_{VR}) \quad (13)$$

gdzie:  $V_{SPBi}$  – prędkość zbliżania się samolotu do przeszkody wynosi:

$$V_{SPBi} = V_S \cos|\Psi_{SV} - \beta_{SPi}| + V_{Pi} \cos|\Psi_{PVi} - \beta_{SPi}| \quad (14)$$

$\omega_{Zakls}$  – przyjęta prędkość kątowna zakrętu w manewrze antykolizyjnym.

Relację między prędkością zakrętu a kątem przechylenia wynikającą z dynamiki lotu określa wzór:

$$\omega_z = g \operatorname{tg}(\Phi_z) / V_S \quad (15)$$

W pracy zaproponowano trzy następujące wartości kąta przechylenia  $\Phi_{Zaki}$ : 40°, 50° i 60° wykorzystywane w czasie manewru antykolizyjnego. Ze względu na bezpieczeństwo antykolizyjnego manewru kierunku ominięcia przeszkody (kierunek zakrętu) określa się w następujący sposób: jeśli spełniona jest nierówność  $\rho_1 - \Psi_{VR} < \rho_2 - \Psi_{VR}$ , to zakręt wykonywany jest w lewo czyli  $\omega_{Zakls} < 0$ , w przeciwnym razie jest  $\omega_{Zakls} > 0$ .

Manewr zakrętu jest wykonywany o taką wartość kąta odchylenia, która spowoduje, że kąt wektora prędkości względnej będzie wynosił dla zakrętu w prawo:

$$\Psi_{SV1} = \rho_1 + 2\beta_0 - \arcsin[\sin(\rho_1 + 2\beta_0 - \Psi_{VP})V_P/V_S] \quad (16)$$

a w lewo przyjmie wartość następującą:

$$\Psi_{SV2} = \rho_1 - \arcsin[\sin(\rho_1 - \Psi_{VP})V_P/V_S] \quad (17)$$

Do zakończenia manewru antykolizyjnego niezbędne jest spełnienie jednocześnie dwóch warunków [4]:

$$\Psi_{SPVi} > \rho_{1i} \wedge \Psi_{SPVi} < \rho_{2i} \quad (18)$$

gdzie spełnione jest  $\rho_{2i} > \rho_{1i}$ .

Jednocześnie prawdziwość nierówności (18) jest momentem rozpoczęcia manewru powrotu. Przyjęto, że składa się on z dwóch zakrętów wykonanych z kątem przechylenia  $\Phi_{Zaki}$  równym:

$$\Phi_{ZakP} = \operatorname{arctg}(2V_S^2/gD_{SPT}), \quad (19)$$

gdzie:  $D_{SPT} = \sqrt{(x_{1S} - x_{TP})^2 + (y_{1S} - y_{TP})^2}$  jest odległością samolotu o współrzędnych  $(x_{1S}, y_{1S})$  od najbliższego punktu zaplanowanej trasy o współrzędnych  $(x_{TP}, y_{TP})$ .

Pierwszy zakręt wykonywany jest z zadaniem kątem odchylenia samolotu równym końcowemu kątowi w manewrze antykolizyjnym i w kierunku przeciwnym do  $\omega_{Zakl,s}$ , a drugi w tym samym kierunku, co  $\omega_{Zakl,s}$  z zadaniem kątem odchylenia równym kątowi  $\Psi_{TPi}$  najbliższego odcinka drogi wynikającego z planu lotu przygotowanego przed startem. Zakończenie manewru powrotu wymaga spełnienia dwóch następujących warunków:

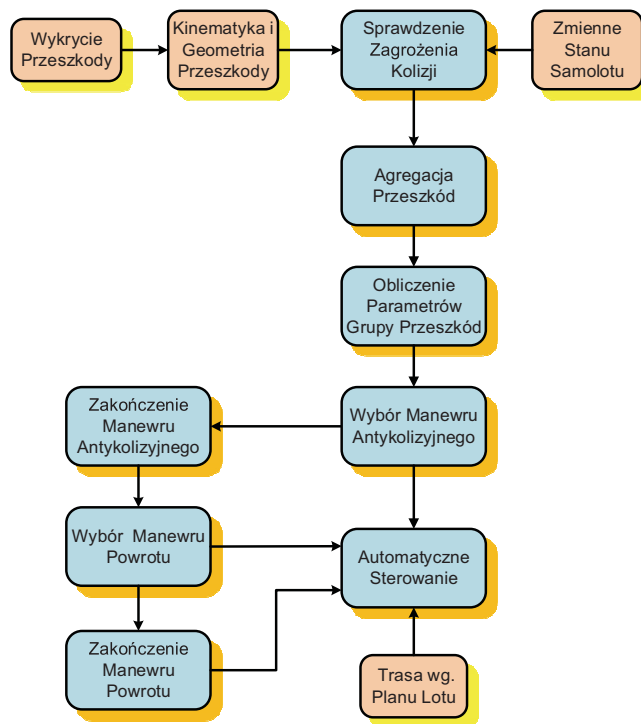
$$|\Psi_{TPi} - \Psi_s| \leq \varepsilon_\psi \quad D_{SPi} \leq \varepsilon_D \quad (20)$$

Pierwszy warunek dotyczy osiągnięciażądanego kursu samolotu z przyjętą dokładnością  $\varepsilon_\psi$ , a drugi dotyczy położenia samolotu zgodnego z najbliższym odcinkiem zaplanowanej trasy z dokładnością  $\varepsilon_D$ .

### 5. Opis struktury omijania zagregowanej grupy ruchomych przeszkód

Sposób współdziałania istotnych etapów przygotowania i realizacji omijania zagregowanych przeszkód przedstawiono na schemacie (rys. 3). Wykrycie i zidentyfikowanie przez detektor [1] wcześniej nieznanych przeszkód wraz z estymacją aktualnych parametrów ich ruchu i samolotu stanowią niezbędne przesłanki wyboru bezpiecznego manewru.

Na podstawie analizy szeregu zmiennych charakteryzujących ruch samolotu i przeszkód i ich wzajemnego położenia (rys. 3) sprawdzane jest czy występuje zagrożenie kolizji z wykrytymi przeszkodami [3, 4]. Następnie wszystkie zidentyfikowane przeszkody jako niebezpieczne są sprawdzane pod kątem możliwości ich zagregowania do jednej wspólnej grupy. W tym celu realizowany jest algorytm pokazany na rys. 2. Po dokonaniu wyboru przeszkód i ich sklasyfikowaniu do określonej grupy wyliczane są jej parametry takie jak prędkość i kierunek poruszania oraz promień okręgu, stanowiący geometryczną granicę dla tej grupy i ew. zmiany wartości tego promienia w funkcji czasu. Po wyliczeniu tych wielkości dobierany jest i wykonywany manewr omi-

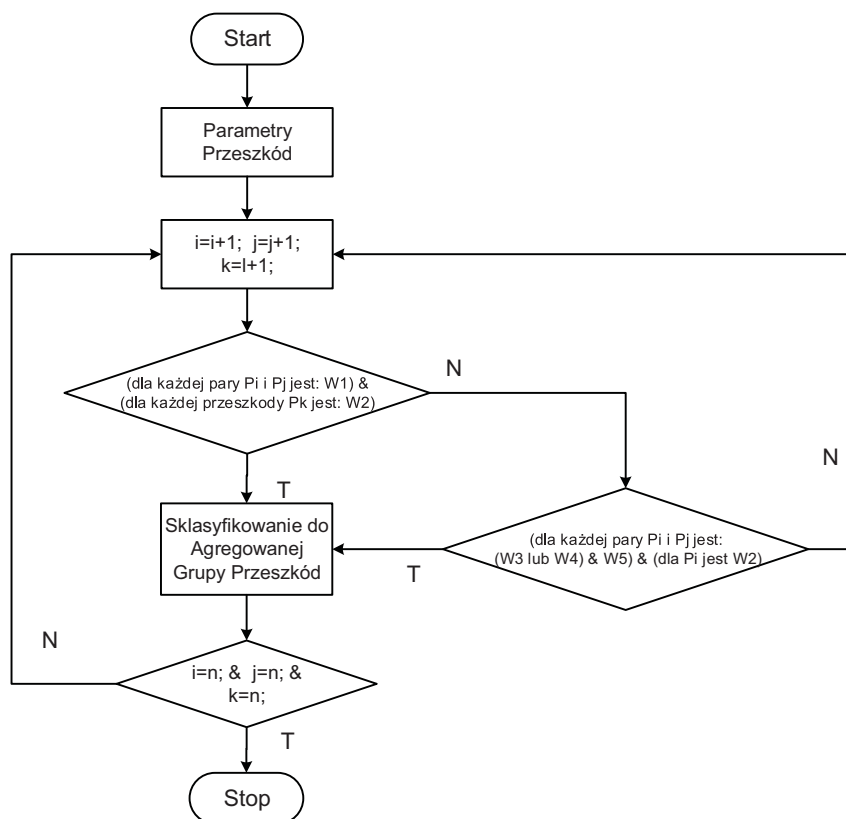


Rys. 3. Schemat struktury omijania zagregowanej grupy ruchomych przeszkód

Fig. 3. Structure diagram of avoiding of obstacles aggregated group

jania aż do momentu, gdy zostanie wyeliminowane zagrożenie i jednocześnie, gdy pochodna odległości samolotu od zagregowanej grupy osiągnie ujemną wartość.

Po stwierdzenie braku zagrożenia kolizją następuje zakończenie manewru antykolizyjnego wyliczenie niezbędnych parametrów manewru powrotu na zaplanowaną trasę i jego uruchomienie. W trakcie trwania manewru powrotu cały czas sprawdzane



Rys. 2. Schemat blokowy algorytmu tworzenia zagregowanej grupy przeszkód

Fig. 2. Block diagram of the algorithm of creating of an aggregated group of obstacles

Tabela 1. Parametry charakterystyczne dla przykładowych scenariuszy

Table 1. Characteristic parameters of the example scenarios

Scenariusz – 1 (SC – 1) ( $r_{CMBi} = 260$ m)						
Nr przeszkody	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Prędkość [m/s]	51	52	49	48	50	50
Kąt drogi [deg]	122	120	123	121	122	121
Minimalna odległość [m]	1185,9	739,8	452,2	1061,8	695,4	718,4
Scenariusz – 2 (SC – 2) ( $r_{CMBi} = 100$ m)						
Nr przeszkody	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Prędkość [m/s]	51	52	49	48	50	50
Kąt drogi [deg]	122	120	123	121	122	121
Minimalna odległość [m]	1353,9	809,4	454,2	1152,7	920,0	811,3
Scenariusz – 3 (SC – 3) ( $r_{CMBi} = 100$ m)						
Nr przeszkody	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Prędkość [m/s]	51	52	45	48	55	50
Kąt drogi [deg]	122	120	123	121	122	121
Minimalna odległość [m]	1188,8	741,1	464,4	1063,6	776,3	718,8
Scenariusz – 4 (SC – 4) ( $r_{CMBi} = 100$ m)						
Nr przeszkody	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Prędkość [m/s]	51	52	55	48	45	50
Kąt drogi [deg]	122	120	123	121	122	121
Minimalna odległość [m]	1208,5	1265,5	847,5	1242,6	453,2	1089,4

jest, czy nie wystąpi nowe zagrożenie kolizji. Jeśli pojawi się wspomniane zagrożenie, następuje ponowne wyliczenie aktualnych parametrów manewru antykolizyjnego, a następnie przerywany jest manewr powrotu i rozpoczyna się realizacja nowego manewru antykolizyjnego. Zakończenie całego manewru omijania nastąpi w sytuacji, gdy nie są wykryte jakiegokolwiek zagrożenia kolizji i zostały osiągnięte założone dokładności kąta kursu i położenia względem aktualnego odcinka drogi w planie lotu.

## 6. Przykłady manewrów omijania zagregowanej przeszkody dla różnych scenariuszy

Poniżej przedstawiono przykłady manewrów omijania przez samolot zagregowanej grupy składającej się z pięciu przeszkód poruszających się blisko siebie. Dobór wartości modułów wektora prędkości i kąty wektorów prędkości tych przeszkód zostały wybrane dla różnych scenariuszy w sposób pozwalający uzyskać różne zachowanie się wartości promienia  $r_{CMBAG}$  zastępczej zagregowanej przeszkody. W wyniku przyjętych przykładowych różnic między modułami i kątami wektora prędkości dla poszczególnych przeszkód uzyskano stałą wartość promienia  $r_{CMBAG}$  dla SC – 1, malejącą dla SC – 2 oraz rosnącą w mniejszym tempie dla SC – 3 i większym tempie dla SC – 4. Wszystkie przeszkody miały tę samą wartość promienia dla SC – 1 wynosił  $r_{CMBi} = 260$  m a dla pozostałych  $r_{CMBi} = 100$  m. Charakterystyczne parametry opisujące przyjęte scenariusze zamieszczono w tabeli 1.

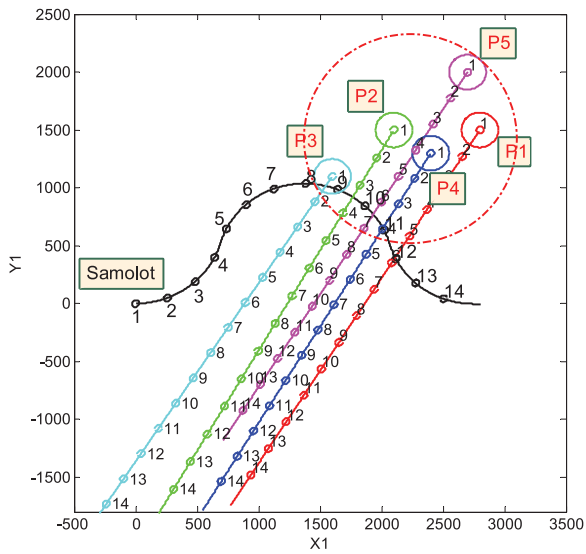
Pięć przeszkód poruszających się w zwartej grupie występujące we wszystkich scenariuszach ma podobne kąty wektora prędkości mieszczące się w przedziale między  $120^\circ$  a  $123^\circ$ . Poruszają się z podobną prędkością, różniącą się maksymalnie w granicach między 45 m/s a 55 m/s. Przy czym zakres tego przedziału jest

różny dla poszczególnych scenariuszy. Różnice modułu wektora prędkości powodują różne zachowania wartości promienia  $r_{CMBAG}$  zagregowanej grupy przeszkód. Od SC – 1, w którym  $r_{CMBAG}$  ma stałą wartość w czasie trwania całego manewru omijania, do scenariusza – 4, gdzie wartość  $r_{CMBAG}$  charakteryzuje się tendencją szybkiego wzrostu. Na rysunkach 4, 6, 8 i 10 przedstawiono przebieg trajektorii samolotu i przeszkód dla SC – 1, 3 i 4. Dla SC – 1 używano identyczną trajektorię samolotu w porównaniu do SC – 3. Na tych rysunkach zaznaczono przerywaną linią w kolorze czerwonym okrąg o promieniu  $r_{CMBAG}$  reprezentujący zagregowaną grupę przeszkód w położeniu dla czasu  $t = 0$  s. Kolejne położenia przeszkód i samolotu opisano liczbami naturalnymi od 1 dla  $t = 0$  s aż do  $n$  dla czasu zakończenia symulacji. W początkowym położeniu dla każdej z przeszkód został narysowany okrąg o promieniu  $r_{CMBi}$ .

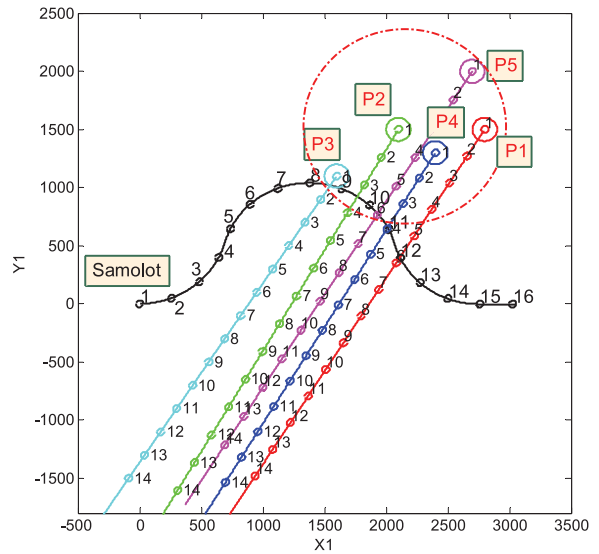
Dla SC – 1 przyjęte położenia chwilowe, prędkości ruchu przeszkód (tabela 1) oraz wyliczony promień  $r_{CMBAG} = 710,6$  m wymagał pokazanego na rys. 4 przebiegu trajektorii omijania grupy przeszkód.

Najmniejsza odległość, w jakiej samolot omija zagregowaną grupę jest bliska wartości  $r_{CMBAG}$  i wynosi  $r_{SPag} = 718,4$  m (tabela 1 i rys. 5). Najmniejsza odległość od samolotu w (trakcie wykonywania manewru omijania) jest dla przeszkody P5 i wynosi  $r_{SPi} = 695,4$  m i jest jednocześnie znacznie większa od  $r_{CMBi} = 200$  m. Pomimo zmian w czasie wartości promienia  $r_{CMBAG}$  dla wszystkich pozostałych scenariuszy uzyskano (podczas symulowanych manewrów omijania) odległości na poziomie nie mniejszym niż SC – 1.

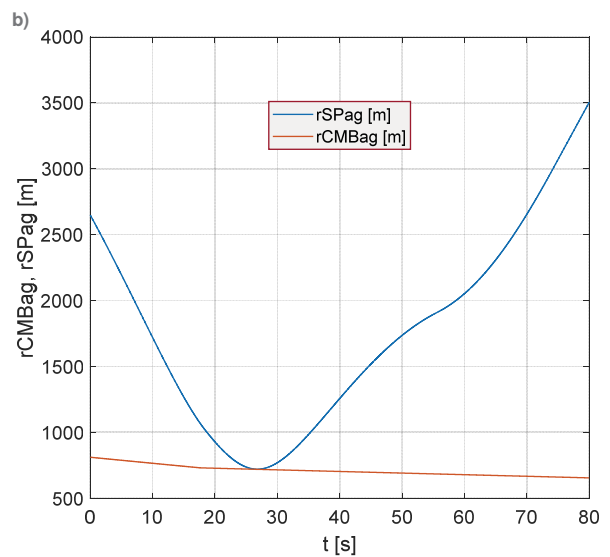
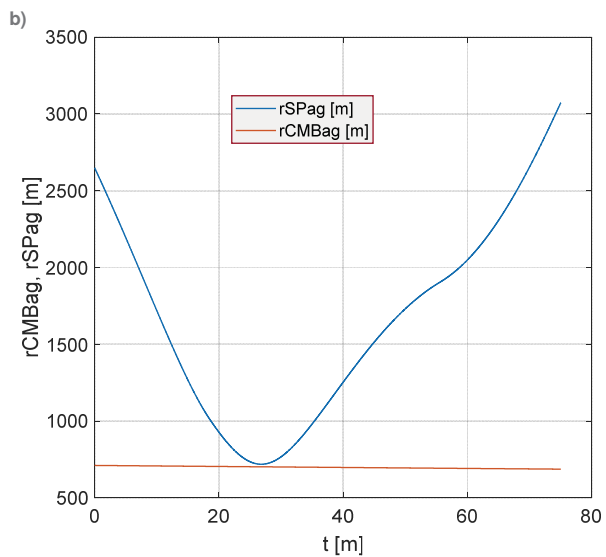
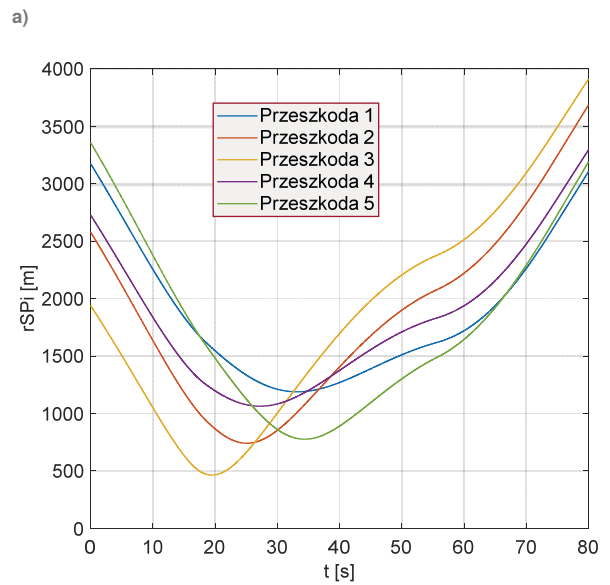
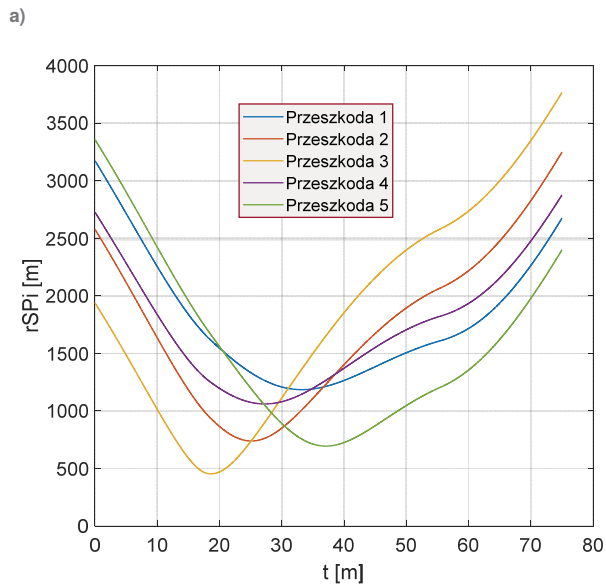
Szczególnie niekorzystna sytuacja została wybrana dla SC – 4, gdzie występuje znaczny wzrost wartości promienia  $r_{CMBAG}$  zawierający się w przedziale od 810,6 m do 1205,4 m (rys. 9). Jednak w chwili osiągnięcia najmniejszej odległości samolotu od zagregowanej grupy wynoszącej  $r_{SPag} = 1089,4$  m promień zagregowanej grupy osiągnął w tym czasie wartość  $r_{CMBAG} = 1088,4$  m.



Rys. 4. Trajektorie samolotu i przeszkód dla SC - 1  
Fig. 4. Trajectory of the airplane and trajectory of obstacles for SC - 1

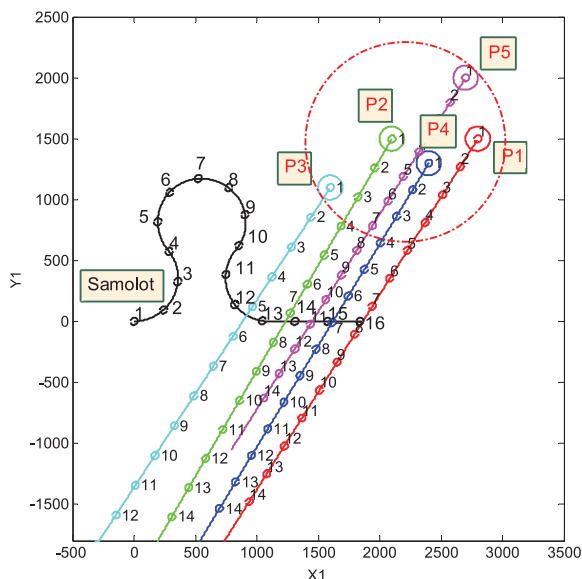


Rys. 6. Trajektorie samolotu i przeszkód dla SC - 2  
Fig. 6. Trajectory of the airplane and trajectory of obstacles for SC - 2

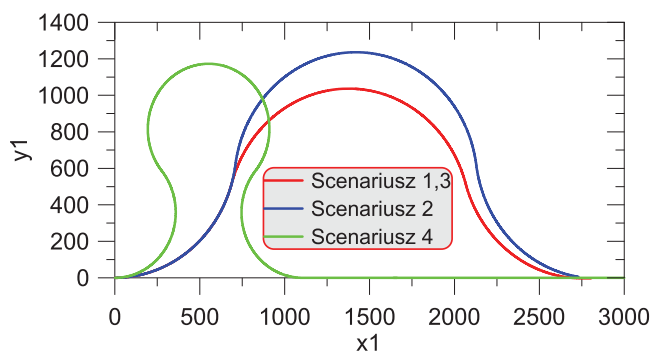


Rys. 5. a) Odległości każdej z pięciu przeszkód od samolotu, b) odległość przeszkody zastępczej od samolotu i przebieg promienia przeszkody zastępczej dla SC - 1  
Fig. 5. The distances from the airplane to five obstacles and to an alternative obstacle and its radius for SC - 1

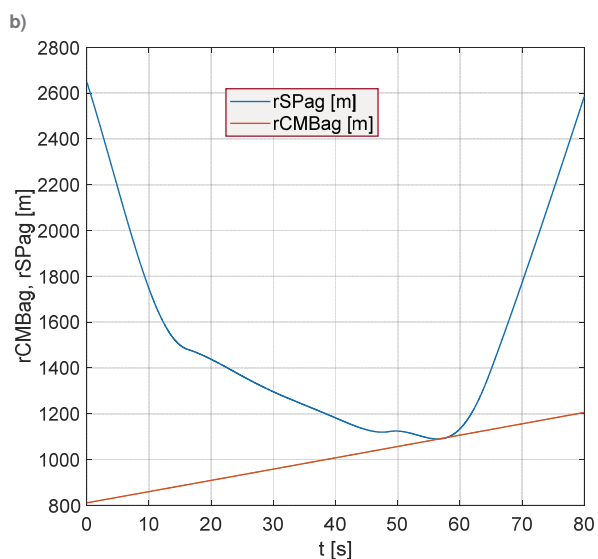
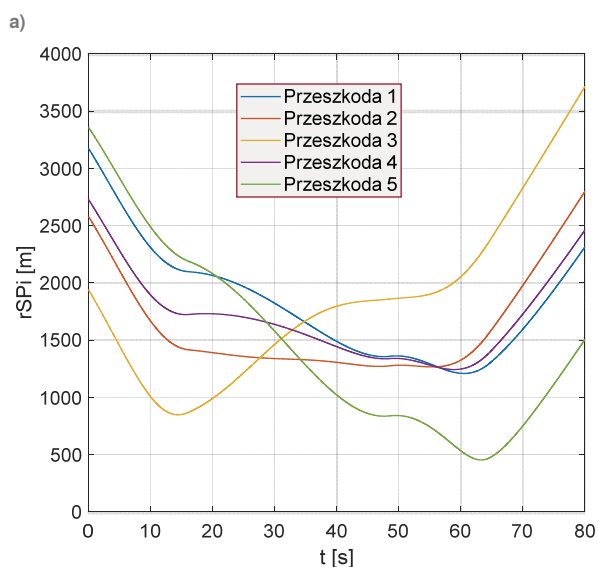
Rys. 7. a) Odległości każdej z pięciu przeszkód od samolotu, b) odległość przeszkody zastępczej od samolotu i przebieg promienia przeszkody zastępczej dla SC - 2  
Fig. 7. The distances from the airplane to five obstacles and to an alternative obstacle and its radius for SC - 2



Rys. 8. Trajektorie samolotu i przeszkód dla SC - 4  
Fig. 8. Trajectory of the airplane and trajectory of obstacles for SC - 4



Rys. 10. Porównanie trajektorii manewrów omięcia zagregowanej grupy ruchomych przeszkód dla SC - 1, 2, 3 i 4  
Fig. 10. The comparison of manoeuvre trajectories of an aggregated group of moving obstacles



Rys. 9. a) Odległości każdej z pięciu przeszkód od samolotu, b) odległość przeszkody zastępczej od samolotu i przebieg promienia przeszkody zastępczej dla SC - 4  
Fig. 9. The distances from the airplane to five obstacles and to an alternative obstacle and its radius for SC - 4

Dla tego ostatniego scenariusza samolot omija przeszkodę P5 w najmniejszej odległości wynoszącej 453,2 m. Nietypowy w tym scenariuszu, w porównaniu do pozostałych, jest stosunkowo długi czas równy 63,3 s, po którym następuje osiągnięcie najmniejszej z minimalnych odległości od przeszkody (w tym wypadku od P5). Powodem tak długiego czasu może być kształt trajektorii omijania dla SC - 4, pokazany na rys. 8 i 10, różniący się od pozostałych znacznie większą wartością maksymalnego kąta odchylenia manewrującego samolotu, który w tym scenariuszu osiągnął wartość 129,6°.

## 7. Wnioski

Przedstawiony materiał teoretyczny oraz wyniki symulacji numerycznej agregacji przeszkód i manewru omijania ruchomych przeszkód pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- Sformułowane w pracy logiczne warunki umożliwiają podjęcie właściwej decyzji o przypisaniu poruszających przeszkód do danej zagregowanej grupy.
- Istnieją scenariusze, dla których podczas trwania manewru omięcia zagregowanej grupy niezbędne jest uwzględnienie zmian wartości promienia okręgu  $r_{CMBAG}$ .
- Stosunkowo nieduże różnice prędkości między poruszającymi się przeszkodami w jednej zagregowanej grupie mogą powodować znaczne zmiany w czasie promienia okręgu  $r_{CMBAG}$ .
- Uzyskane doświadczenia w trakcie badań symulacyjnych wskazują, że 10 % różnice między wartościami prędkości poruszających się przeszkód są dopuszczalne przy tworzeniu z tych przeszkód zagregowanej grupy.
- Wykonywanie zaproponowanych antykolizyjnych manewrów zapewniło utrzymanie wymaganych dystansów  $r_{CMBAG}$  dla zastępczej przeszkody. Jednocześnie zostały zachowane, przeważnie z dużym zapasem, marginesy bezpieczeństwa dla wszystkich ruchomych przeszkód.

Przedstawiona metoda wymaga dalszych badań dla szeregu scenariuszy uwzględniających różne wzajemne usytuowanie przeszkód, różne kąty wektora prędkości i jego moduły.

## Bibliografia

1. Graffstein J., *Functioning of air anti-collision system during test flight*, "Aviation", Vol. 18, No. 1, 2014, 44–51, DOI: 10.3846/16487788.2014.865945.
2. Graffstein J., *Dobór parametrów manewru antykolizyjnego i jego przebieg*, „Prace Instytutu Lotnictwa”, Nr 224, 2012, 31–43.
3. Graffstein J., *Elementy procesu wykrycia zagrożenia kolizją i automatycznie sterowany manewr awaryjny*. „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 16, Nr 2, 2012, 383–387.
4. Graffstein J., *Selected aspects of automatic maneuver control to avoid moving obstacles resulting from the simulation analysis of the course of aircraft movement*, Advances in Intelligent Systems and Computing, "Challenges in Automation, Robotics and Measurement Techniques", Vol. 440, 2016, 127–139, DOI: 10.1007/978-3-319-29357-8\_12.
5. Jung T., Piera M.A., Ruiz S., *A causal model to explore the ACAS induced collisions*, "Journal of Aerospace Engineering", Vol. 228, No. 10, 2015, 1735–1748, DOI: 10.1177/0954410014537242.
6. Lin C.E., Wu Y.-Y., *Collision avoidance solution for low-altitude flights*, "Journal of Aerospace Engineering", Vol. 225, No. 1, 2011, 779–790, DOI: 10.1177/0954410011399211.
7. Lin Z., Castano L., Mortimer E., Xu H., *Fast 3D collision avoidance algorithm for fixed wing UAS*, "Journal of Intelligent & Robotic Systems", Vol. 97, 2019, 577–604, DOI: 10.1007/s10846-019-01037-7.
8. Orefice M., Di Vito V., *Aircraft automatic collision avoidance using spiral geometric approach*, International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology (ICASAT), 2016, 1–10, DOI: 10.5281/zenodo.1123671.
9. Paielli R.A., *Modeling maneuver dynamics in air traffic conflict resolution*, "Journal of Guidance, Control, and Dynamics", Vol. 26, No. 3, 2003, 407–415, DOI: 10.2514/2.5078.
10. Stevens B.L., Levis F.L., *Aircraft Control and Simulation*, Wiley & Sons, Inc., 2016.
11. Tang J., Piera M.A., Baruwā O.T., *A discrete-event modeling approach for the analysis of TCAS-induced collisions with different pilot response times*, "Journal of Aerospace Engineering", Vol. 229, No. 13, 2015, 2416–2428, DOI: 10.1177/0954410015577147.

## The Avoiding Manoeuvre Against Aggregated Group of Obstacles Moving Around the Airplane

**Abstract:** Successful avoidance of a mid air collision with moving obstacles depends on solutions of some most essential problems, e.g.: quick detection of an obstacle, verification whether detected obstacle is a critical one and making right decision on evasive manoeuvre. This decision – making process requires an appropriate identification of a threat's nature, including whether detected obstacles should be treated as one aggregated group. Aggregation of obstacles moving in short distance one to the other is a typical case. The paper addresses also the case of inclusion the obstacle to the group objects moving in longer distances one to the other. The algorithm used for deciding whether a moving obstacle should be added to (aggregated with) a given group has been presented. A method for computing its characteristic parameters has been presented too. Selected scenarios of avoiding the aggregated group of moving obstacles have been simulated and results obtained illustrates problems considered.

**Keywords:** collision avoidance, evasive manoeuvre, flight control, numerical simulation

### dr inż. Jerzy Graffstein

jerzy.graffstein@ilot.edu.pl  
ORCID: 0000-0002-9329-8648

Adiunkt w pionie Centrum Technologii Kosmicznych Instytutu Lotnictwa. Jego zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia modelowania dynamiki ruchu obiektów latających, automatyczne sterowania lotem wzdłuż zadanej trajektorii, oraz zagadnienia autonomicznych systemów antykolizyjnych w zastosowaniach lotniczych.

