

Sposób wyboru optymalnej trajektorii lotu manewru antykolizyjnego realizowanego w otoczeniu ruchomych przeszkód

Jerzy Graffstein

Instytut Lotnictwa, Centrum Technologii Kosmicznych, Aleja Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa

Streszczenie: Do rozwiązania problemu unikania przeszkód przez poruszający się samolot w przestrzeni powietrznej niezbędne jest wykrycie zagrożenia kolizji oraz wykonanie bezpiecznego manewru w celu ominięcia zagrażających przeszkód. W pracy przedstawiono sposób wykrywania niebezpieczeństwa zderzenia z przeszkodą dla przypadku, gdy w otoczeniu samolotu znajduje się wiele ruchomych obiektów. Zaproponowano sposób wyboru optymalnej trajektorii manewru antykolizyjnego, i potwierdzono jej wykonalność. Wybór trajektorii przeprowadzono rozwiązując zagadnienie optymalizacji metodą roju cząstek (PSO). W tym celu zaproponowano postać funkcji celu i przedstawiono wyniki analizy jej przebiegu dla różnych współczynników wagowych. Wykonane symulacje lotu wzdłuż optymalnej trajektorii manewru antykolizyjnego potwierdziły wykonalność takiego manewru.

Słowa kluczowe: unikanie kolizji, trajektoria manewru antykolizyjnego, komputerowa symulacja dynamiki lotu, optymalizacja roju cząstek (PSO)

1. Wprowadzenie

Wśród wielu różnych zagrożeń występujących w czasie lotu samolotu jest możliwość wystąpienia kolizji z więcej niż jedną ruchomą przeszkodą.

Rozważania dotyczące omijania ruchomych przeszkód powinny uwzględniać szybkie (często nie w pełni przewidywalne) zmiany konfiguracji wzajemnych położeń i sposobu ruchu obiektów. Jednym z czynników, jaki wpływa na jej tylko częściową przewidywalność i szybkie zmiany obserwowanych obiektów jest ograniczony zasięg wykrywania przeszkód wynikający z technicznych możliwości zastosowanego detektora przeszkód [3]. W trakcie lotu samolotu zmniejszają się odległości od obiektów znajdujących się przede wszystkim w przedniej półpłaszczyźnie, dzięki czemu można obserwować kolejne przeszkody, wcześniej niewykryte. Podobne problemy mogą występować w wyniku skończonego kąta widzenia detektora. W wielu pracach poświęconych opisywanej problematyce nie są uwzględniane wymienione warunki techniczne. Inną istotną kwestią, która powinna podlegać szczegółowej analizie jest dynamika obiektu wykonującego manewr antykolizyjny. Z tego powodu kształt trajektorii manewru antykolizyjnego oraz sposób jego wykona-

nia podlegają różnym ograniczeniom w zależności od wartości zmiennych stanu lotu samolotu. Do istotnych parametrów, dla których należy uwzględnić ograniczenia należą m.in.: promień zakrętu z uwzględnieniem jego początkowej i końcowej fazy [4, 5], prędkość zakrętu oraz prędkość poruszania się samolotu po trajektorii. W procesie optymalnego wyboru kształtu trajektorii samolotu uwzględniono wymienione ograniczenia. Do symulacji weryfikującej otrzymane rozwiązania wykorzystywano złożony nieliniowy matematyczny model samolotu uwzględniający sposób działania jego serwomechanizmów w układzie wykonawczym, który porusza powierzchniami sterowymi.

W dostępnej literaturze istnieje wiele pozycji dotyczących optymalizacji trasy (lub jej fragmentów) ruchu obiektów omijających przeszkody. Opisywane są tam różne algorytmy optymalizacji a wśród nich rozwijane w ostatnich latach metody wykorzystywane w technikach sztucznej inteligencji, m.in.: ewolucyjne [1], genetyczne [7], gier [10] roju mrówek [13, 14], roju cząstek [2, 7, 9, 11, 14, 16], roju pszczoł [14] i inne. Sensowność rozwiązania za pomocą dowolnej metody optymalizacyjnej zależy od wyboru postaci wskaźnika jakości (funkcji celu) oraz jego współczynników wagowych. W literaturze dotyczącej ruchu pojazdów omijających przeszkody – w zależności od typu omawianego obiektu i zadań, jakie zostały dla niego przewidziane – można spotkać różne funkcje celu. Ich odmienność polega na uwzględnieniu innych elementów składowych. Najczęściej występuje człon odległości od punktu docelowego [11, 13] oraz odległości od przeszkód [1, 10]. Spotykane są również składowe wskaźniki związane z odległością od wcześniej zadanej trasy lub różnica między aktualnym kątem wektora prędkości obiektu a wynikającym z przemieszczania się po zadanej trasie [9]. W niektórych rozwiązaniach dąży się do uzyskania gładkiej trajektorii [1] i w tym celu wprowadzany jest składnik, w którym występuje wartość zmiany kąta wektora prędkości [11].

Autor korespondujący:

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

Artykuł recenzowany

nadesłany 17.09.2018 r., przyjęty do druku 22.11.2018 r.

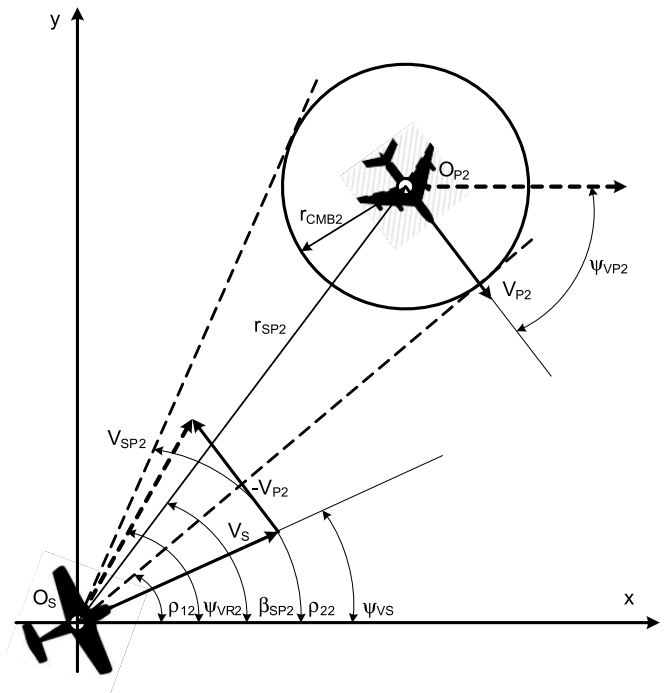


Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

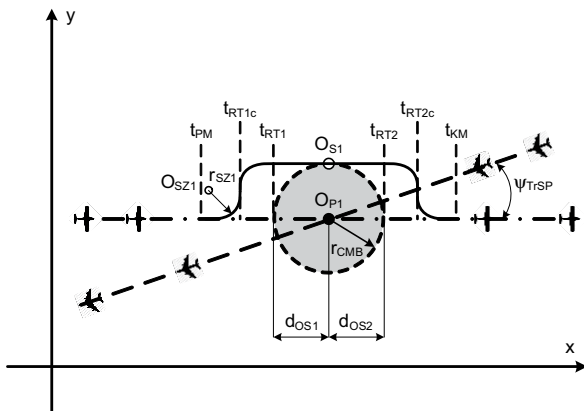
Wprowadza się do wskaźniku jakości względną odległość od przeszkody odniesioną do minimalnej założonej odległości [10] oraz estymowany czas osiągnięcia przez obiekt niebezpiecznej odległości od przeszkody [10].

2. Przyjęta klasa trajektorii manewru antykolizyjnego

W dalszej części pracy zostanie przedstawiony zarys metody, pozwalającej na uniknięcie kolizji samolotu z ruchomymi przeszkodami znajdującymi się w jego otoczeniu. W tym celu konieczne jest wykonanie jednego lub więcej manewrów antykolizyjnych. Taki manewr powinien zapewnić bezpieczne omińnięcia ruchomych przeszkód i powrót do lotu wzdłuż wcześniej zaplanowanej trajektorii. Do rozważań przyjęto pokazaną na rys. 1 klasę trajektorii złożonego manewru omijania ruchomej przeszkody. Składa się z czterech zakrętów i jednego odcinka prostoliniowego. Wszystkie zakręty wykonywane są z tym samym promieniem r_{Szi} i tą samą zmianą kąta odchylenia samolotu. Stanowi jedną z wielu możliwych kształtów trajek-



Rys. 4. Zmienne dla układu samolot–przeszkoda
Fig. 4. Variables for airplane-obstacle arrangement

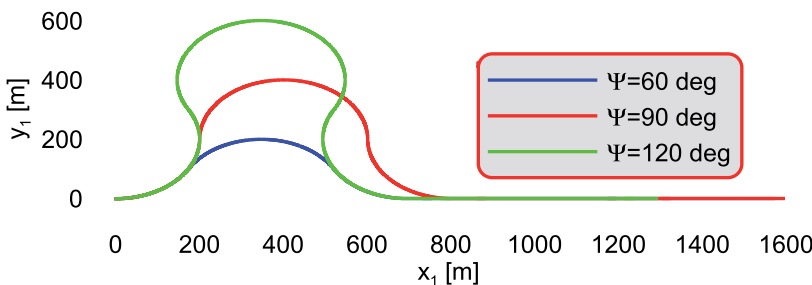


Rys. 1. Proponowana trajektoria manewru omijania
Fig. 1. Suggested trajectory of evasive (anti-collision) manoeuvre

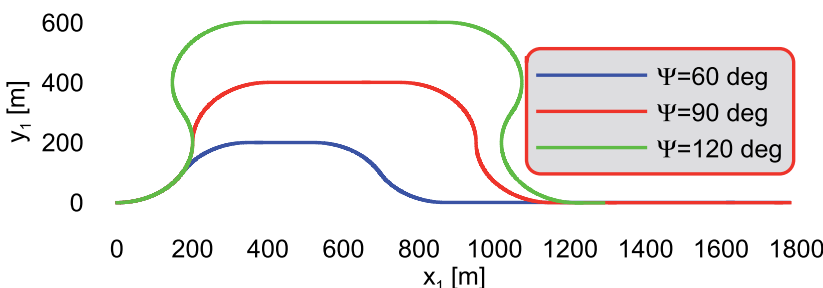
torii pozwalających skutecznie uniknąć kolizji i powrócić do lotu wzdłuż wcześniej zaplanowanej trasy. W ramach wybranej klasy możliwe są różne kształty trajektorii (rys. 2 i 3) różniące się między sobą następującymi parametrami:

- wartością zmiany kąta odchylenia w czasie zakrętu,
- długością prostoliniowego odcinka (włącznie z jego zerową długością),
- wielkością promienia zakrętów,
- czasem rozpoczęcia manewru.

Czwarty wymieniony parametr, tzn. czas rozpoczęcia manewru jest istotny dla jego skuteczności, ale nie wpływa na kształt jego trajektorii.



Rys. 2. Przykładowe przebiegi trajektorii manewru antykolizyjnego bez odcinka prostego
Fig. 2. Examples of anti-collision manoeuvre trajectories without straight line section



Rys. 3. Przykładowe przebiegi trajektorii manewru antykolizyjnego z odcinkiem prostym
Fig. 3. Examples of anti-collision manoeuvre trajectories with straight line section

3. Wykrycie zagrożenia kolizji z ruchomą przeszkodą

Ze względu na możliwość występowania bardzo dużej liczby różnych scenariuszy dotyczących konfiguracji rozmieszczenia i sposobu ruchu otaczających samolot przeszkód przyjęto w ramach niezbędnych ograniczeń następujące założenia:

- dostępne są informacje o przeszkodach tylko w ograniczonym obszarze stanowiącym bliskie otoczenie samolotu uzyskiwane z detektora o ograniczonym zasięgu o określonym wycinku kątowym;
- uzyskiwane są informacje o wielkości przeszkód i parametrach ich ruchu;
- istnieje możliwość występowania deficytu czasu potrzebnego na wykonanie manewru antykolizyjnego;
- uniknięcie kolizji i jej ominięcie odbywa się bez negocjacji z innymi ruchomymi obiektami;
- nie są przestrzegane przepisy w ruchu lotniczym;
- obiekty w otoczeniu samolotu przemieszczają się ze stałymi prędkościami bez zmiany ich kierunków;
- manewr omijania odbywa się w płaszczyźnie poziomej;
- sterowanie i stabilizacja lotu samolotu obejmuje 6 stopni swobody.

Podstawowe kryterium oceny bieżącej sytuacji zagrożenia kolizji z ruchomymi przeszkodami oraz klasyfikacja scenariuszy wykorzystują następujące nierówności:

$$\Psi_{VRi} < \rho_{1i} \vee \Psi_{VRi} > \rho_{2i} \wedge r_{SPi} > r_{CMBi} \quad (1a)$$

$$\text{dla } |\Psi_{VS} - \beta_{SPi}| < 90^\circ \quad (1b)$$

$$\text{dla } |\Psi_{VS} - \Psi_{VPi}| > 90^\circ \wedge |\Psi_{VS} - \Psi_{VPi}| < 270^\circ \quad (1c)$$

Dwie pierwsze części warunku (1a) dotyczą położenia wektora prędkości wypadkowej V_{Ri} [2] względem dwóch stycznych do okręgu o promieniu r_{CMBi} [4] przecinających się w punkcie położenia samolotu. Trzecia nierówność (1a) określa, czy odległość samolotu od przeszkody r_{SPi} nie jest poniżej dopuszczalnej wartości. Jeśli jedna z dwóch pierwszych części warunków (1a) i trzecia jego część są prawdziwe, to nie występuje zagrożenie kolizją. Jeśli warunek (1b) porównujący kąt wektora samolotu Ψ_{VS} z kątem patrzenia β_{SPi} [8, 14] jest prawdziwy, to rozpatrywana przeszkoda znajdująca się w przedniej półpłaszczyźnie samolotu. Dalsze rozważania wykrywania zagrożenia kolizji i omijanie przeszkód będą dotyczyły tylko tych scenariuszy, które spełniają warunek (1b). Gdy nie jest prawdziwa nierówność (1c), to samolot podąża za przeszkodą. W tym przypadku niebezpieczeństwo kolizji wystąpi pod warunkiem spełnienia nierówności: $V_S > V_P$. Sytuacja, w której więcej niż jedna przeszkoda stanowi zagrożenie dla samolotu – tzn. istnieją przeszkody nie spełniające warunku (1a) (z uwzględnieniem 1b i 1c) wymaga wyszukania przeszkody, która powinna być omijana w pierwszej kolejności. Charakteryzuje się ona najmniejszą wartością czasu t_k , jaki samolot potrzebuje do osiągnięcia strefy zakazanej i jest on wyliczany z zależności:

$$t_{ki \min} = \min \left| (r_{SPi} - r_{CMBi}) / V_{SP\beta i} \right| \quad (2)$$

gdzie prędkość zbliżania się samolotu do i -tej przeszkody wynosi:

$$V_{SP\beta i} = V_S \cos |\Psi_{SV} - \beta_{SPi}| + V_{Pi} \cos |\Psi_{PVi} - \beta_{SPi}| \quad (3)$$

Kąty stycznych do okręgu o promieniu r_{CMBi} występujące w warunku (1a) wynoszą:

$$\rho_{1i}, \rho_{2i} = \arctg((y_{Pi} - y_{iS}) / (x_{1Pi} - x_{1iS})) \mp \arcsin(r_{CMBi} / r_{SPi}), \quad (4)$$

Omijanie wybranej przeszkody (stanowiącej zagrożenie kolizji) powoduje zmianę sytuacji w odniesieniu do pozostałych ruchomych przeszkód. W trakcie wykonywania manewru antykolizyjnego oraz w trakcie pewnego czasu po jego zakończeniu mogą wystąpić zagrożenia kolizji z innymi przeszkodami, które były bezpieczne dla samolotu niewykonywającego manewru antykolizyjnego. Z tego powodu dalsze rozważania będą dotyczyć optymalizacji trajektorii manewru antykolizyjnego w przedziale czasu od wykrycia zagrożenia kolizji do pewnego założonego czasu po zakończeniu tego manewru.

4. Wybór wskaźnika jakości dla optymalizacji przebiegu trajektorii antykolizyjnego manewru

Wskaźnik jakości stanowiący podstawę optymalizacji trajektorii manewru antykolizyjnego jest kompromisem między dwoma sprzecznymi celami: najmniejszymi zmianami realizowanej trasy w stosunku do zaplanowanej trasy oraz zapewnieniem największego bezpieczeństwa lotu samolotu. Osiągnięcie wymienionych celów w wyniku optymalizacji zostanie zrealizowane w wyniku następujących działań:

- utrzymanie jak największych minimalnych odległości między samolotem a wszystkimi przeszkodami;
- niedopuszczenie do sytuacji, w której minimalna odległość między samolotem a dowolną przeszkodą zmniejszy się poniżej przyjętej wcześniej wartości;
- dążenie do najkrócej trwającego manewru antykolizyjnego powodującego najmniejsze odległości położenia samolotu od wcześniej zaplanowanej trasy;
- najmniejsze wydłużenia trasy lotu spowodowane wykonaniem manewru antykolizyjnego w porównaniu do długości drogi przebytej wzdłuż zaplanowanej trasy.

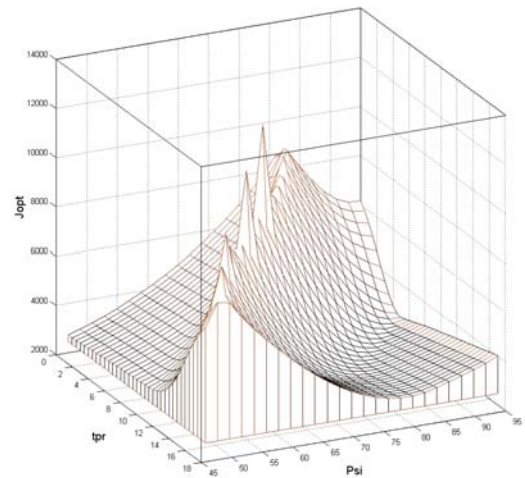
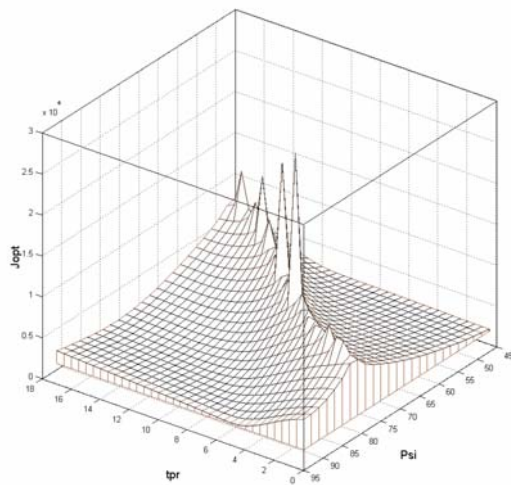
Kierując się wymienionymi wyżej wskazaniem przyjęto następującą formę wieloparametrycznej funkcji celu J_{Opt} wykorzystanej do wyboru optymalnej trajektorii manewru antykolizyjnego:

$$J_{Opt} = w_{SP1}(S_R - S_P) + w_{SP2} \sum_{i=1}^{i=np} r_{SPi} + \sum_{i=1}^{i=np} w_{SP3}(r_{CMBi} - r_{SPi}) + w_{SP4} \sum_{j=1}^{j=npk} \left(\sqrt{(x_{1Sj} - x_{1j})^2 + (y_{1Sj} - y_{1j})^2} \right) \quad (5)$$

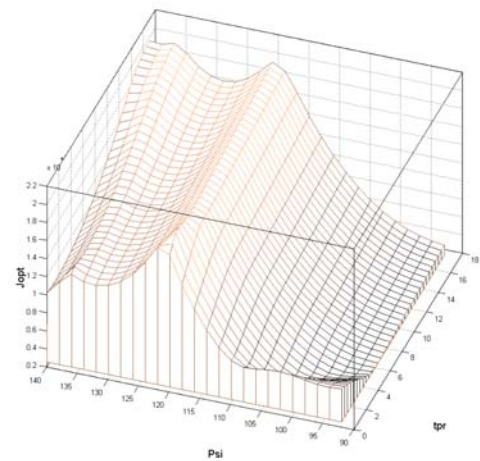
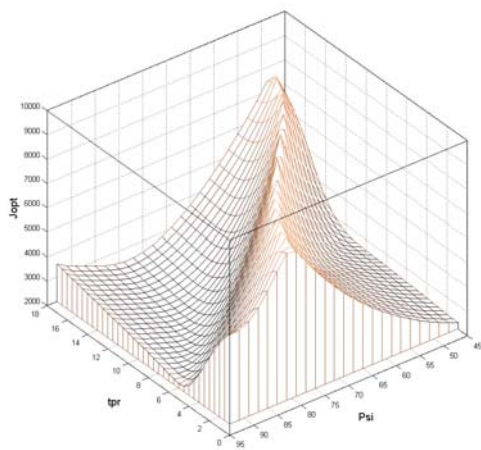
oraz $w_{SP3} = 0$, gdy $r_{SPi} < r_{CMBi}$ dla każdego składnika sumy. gdzie:

- S_R – długość drogi przebytej przez samolot z uwzględnieniem manewru antykolizyjnego,
- S_P – długość drogi przebytej przez samolot zgodnie z planem lotu (bez wykonania manewru antykolizyjnego),
- x_{1j}, y_{1j} – współrzędne punktu leżącego na zaplanowanej trasie najbliższego od aktualnego położenia samolotu (położenia jego środka masy x_{1Sj}, y_{1Sj}).

Określenie wartości współczynników wagowych w_{SPi} przeprowadzono na drodze eksperymentalnej w kolejnych iteracjach. Starano się uzyskać względną równowagę między poszczególnymi składowymi wskaźnika jakości (za wyjątkiem tego, który jest odpowiedzialny za zachowanie założonej minimalnej odległości od przeszkody). Współczynnik wagowy w_{SP3} wybrano na poziomie powodującym wzrost wspomnianego składnika powyżej średniej sumy pozostałych składników. Przyjęto, że taka sytuacja wystąpi, gdy minimalna odległość od którejkolwiek z przeszkód będzie mniejsza od założonej o wartość rzędu 3 m. W procesie doboru współczynników wagowych dążono do wyeliminowania lokalnych, szybkich wzrostów wartości wskaźnika



Rys. 5. Przebieg wskaźnika jakości dla wybranych parametrów i przykładowego ich zakresu
Fig. 5. Quality index transient for selected parameters and example range of its variations



Rys. 6. Przebieg wskaźnika jakości dla wybranych parametrów i różnych ich zakresów
Fig. 6. Quality index transient for selected parameters and different ranges of its variations

jakości, który na początku wspomnianego procesu miał przebiegi pokazane na rys. 5 w wybranym zakresie rozpatrywanych parametrów. Ostatecznie udało się znacznie wyeliminować wspomniane sytuacje i uzyskać pokazane na rys. 6 bardziej gładkie przebiegi tego wskaźnika.

5. Optymalizacja trajektorii manewru antykolizyjnego

Optymalizację trajektorii manewru antykolizyjnego wykonano korzystając z procedury algorytmu optymalizacji roju cząstek PSO (ang. *Particle Swarm Optimization*) zgodnie z opisanym wcześniej wskaźnikiem jakości (5). Metoda PSO jest szczególnie efektywna przy wyliczaniu globalnego ekstremum dla funkcji wielu zmiennych. Wybrane przykłady przebiegu wskaźnika jakości (rys. 5 i 6) pozwalają wnioskować o istnieniu wielu lokalnych ekstremów. Do optymalizacji trajektorii wybrano trzy następujące parametry charakteryzujące jej przebieg:

- wartością zmiany kąta odchylenia w czasie zakrętu,
- długością prostoliniowego odcinka (z uwzględnieniem jego zerowej długością),
- czasem rozpoczęcia manewru.

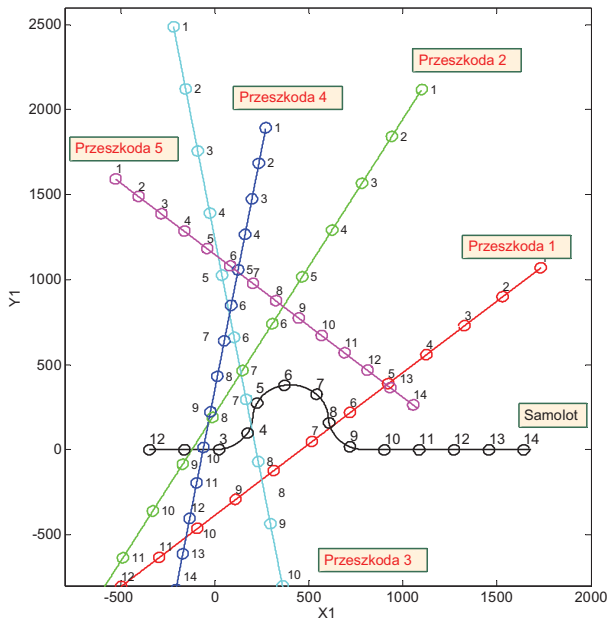
Pominięto zmianę parametru odpowiadającego promieniowi zakrętu ze względu na przyjęte w dalszej części pracy warunki lotu samolotu znacznie ograniczające zakres zmian wspomnianego promienia.

Procedura optymalizacji roju cząstek PSO jest nowoczesną, obiecującą metodą z obszaru sztucznej inteligencji. Jest inspirowana zachowaniem żywych organizmów, które w tej metodzie reprezentowane są przez autonomiczne, ale jednocześnie współpracujące ze sobą cząstki. Ich sposób poruszania jest zdeterminowany przez podane dalej zależności pozwalające na znalezienie optymalnej wartości założonej funkcji. Algorytm PSO rozpoczyna swoje działanie od zainicjowania najczęściej losowo (lub ewentualnie zgodnie z narzuconymi warunkami początkowymi) położen cząstek stanowiących odpowiednik poszukiwanego rozwiązania. W dalszych krokach poszukiwane jest optymalne położenie cząstek (zgodnie z przyjętą funkcją celu) przez odpowiednie zmiany ich położen.

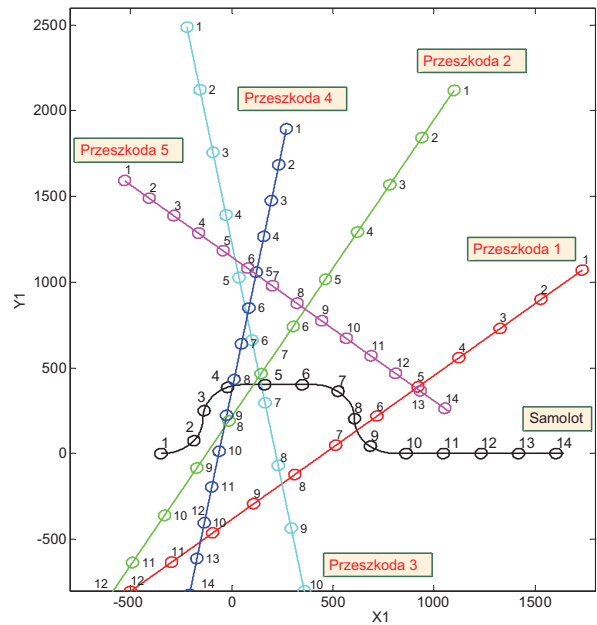
W kolejnych iteracjach aktualizacja prędkości dokonywana jest według następującej zależności [7, 10]:

$$v_i(t+1) = w v_i(t) + c_1 r_1 (x_{i,best}(t) - x_i(t)) + c_2 r_2 (x_{g,best}(t) - x_i(t)) \quad (6)$$

gdzie x_i – aktualne położenie i -tej cząstki,



Rys. 7. Scenariusz ruchu pięciu przeszkód i samolotu – manewr antykolizyjny uzyskany w procesie optymalizacji
Fig. 7. Motion scenario for an airplane and five obstacles – the anti-collision manoeuvre obtained by optimisation



Rys. 8. Scenariusz ruchu pięciu przeszkód i samolotu – przykładowy manewr
Fig. 8. Five obstacles and airplane motion scenario – the example manoeuvre

- $x_{z, best}$ – najlepsza pozycja znaleziona przez cząstkę w k -tej iteracji,
 $x_{g, best}$ – najlepsza pozycja znaleziona przez cząstkę w k -tej iteracji,
 r_1, r_2 – liczby losowe z przedziału $[0, 1]$, zapewniające różnorodność roju,
 c_1, c_2 – współczynniki o najczęściej stałych wartościach, określające wpływ poszczególnych składników aktualizacji prędkości, c_1 odpowiedzialny za zachowanie cząstki (tzw. współczynniki *osobniczy*) w przedziale od 1,5 do 2,0 oraz c_2 odpowiedzialny za zachowanie roju (tzw. współczynniki *sojeczalny*) w przedziale od 2,0 do 2,5,
 w – współczynnik inercji o wartości stałej [16] z przedziału 0,4 do 1,4 albo według innej propozycji wyliczany z zależności [11]:

$$w(k) = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{n} k \quad (7)$$

gdzie: n – maksymalna liczba iteracji, k – aktualny numer iteracji.

Nowe położenie i -tej cząstki o wektorze prędkości zgodnym z zależnością (6) wyliczane jest w następujący sposób [7, 10]:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v(t+1) \quad (8)$$

W dalszej części pracy zostaną przedstawione wyniki optymalizacji przebiegu trajektorii manewru antykolizyjnego uzyskane metodą PSO.

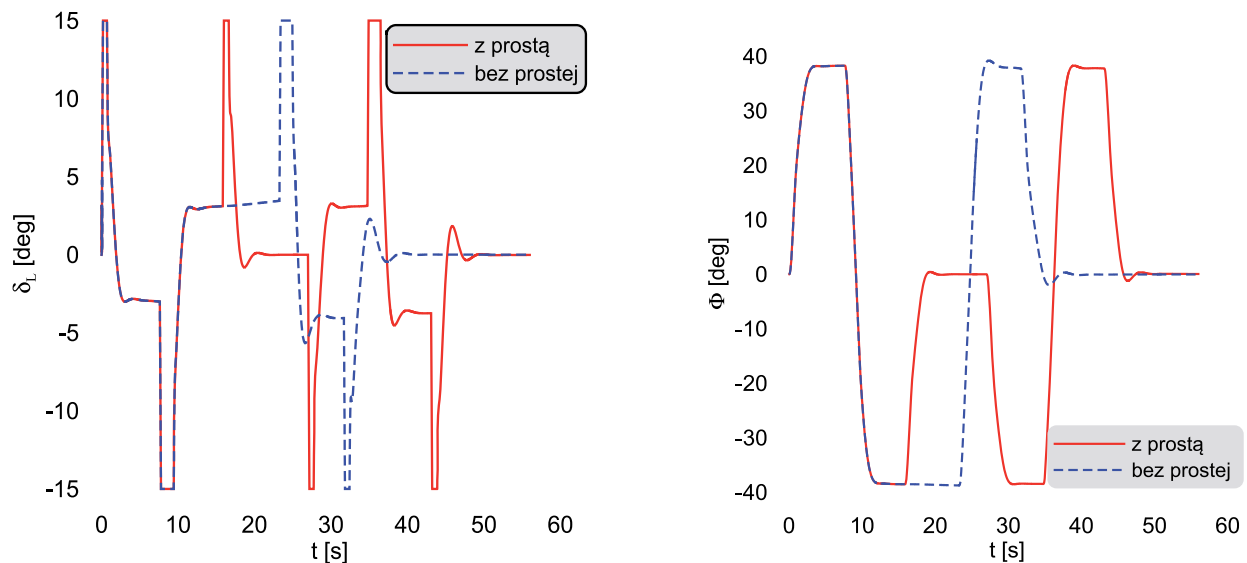
6. Wyniki obliczeń

Do obliczeń optymalizacyjnych i symulacji przyjęto matematyczny model samolotu [15] typu I-23 Manager, którego rozpiętość skrzydeł wynosi 8,95 m oraz całkowita masa równa jest 1050 kg. Założono, że samolot we wszystkich obliczeniach porusza się ze stałą prędkością liniową względem Ziemi 35 m/s na stabilizowanej wysokości 200 m. Wszystkie zakręty odbywały się z tym samym kątem przechylenia $\Phi = 40^\circ$ (dla warunków

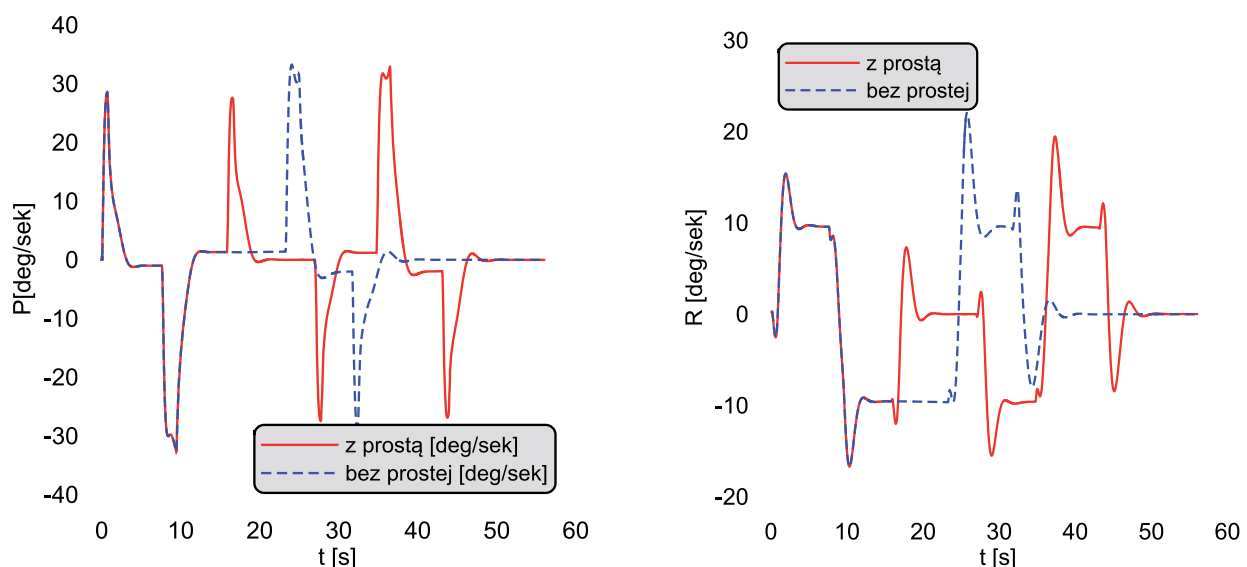
ustalonych). Jak wynikało z przeprowadzonych badań symulacyjnych dla założonej wartości prędkości poruszania się samolotu założony kąt przechylenia $\Phi = 40^\circ$ w ustalonym zakręcie stanowił maksymalną wartość dopuszczalną dla rozważanego obiektu. Dalsze rozważania będą dotyczyły zaproponowanego na rys. 7 i 8 przykładu scenariusza ruchu obiektów. Przeszkody poruszały się na tej samej wysokości, co samolot i ze stałą prędkością, ale wartość prędkości dla każdej z przeszkód była inna i zawierała się w przedziale od 30 m/s do 70 m/s. Przeszkody poruszały się w stałym kierunku i między sobą różniły się kątem wektora prędkości. Naniesione liczby na wykresach (rys. 7 i 8) pozwalają zorientować się o położeniu wszystkich obiektów w wybranych punktach czasowych.

Przyjęto, że minimalna odległość samolotu od wszystkich przeszkód nie powinna być mniejsza niż 270 m. W wyniku działania oprogramowania wykorzystującego procedurę PSO uzyskano następujący zestaw parametrów: zmiana kąta odchylenia dla wszystkich zakrętów $-\Delta\Psi = 87,28^\circ$, czas rozpoczęcia manewru $t_{pm} = 10,1$ s oraz czas lotu wzdłuż linii prostej $t_{pr} = 0,02$ s, co odpowiada odcinkowi o długości około 1 m. Wymienione wartości opisują optymalny przebieg trajektorii manewru antykolizyjnego w rozumieniu wskaźnika jakości opisanego wzorem (5). Dla tych parametrów trajektorii najmniejsza odległość od dowolnej przeszkody wynosiła: $r_{sp1} = 270,14$ m (przeszkoda nr 1 rys. 7 i 8), a wszystkie pozostałe przeszkody w całym czasie trwania manewru były oddalone od samolotu więcej niż 323 m. Omawiane manewry były sterowane automatycznie zgodnie z prawami sterowania [6]. Przeprowadzono symulacje lotu samolotu wykonującego manewr antykolizyjnego z parametrami trajektorii uzyskanymi w procesie optymalizacji. Porównano je z wynikami symulacji manewru antykolizyjnego nieposiadającego prostego odcinka, ale realizującego identyczne zakręty.

Wybrane zmienne stanu i sterowania pokazano na wykresach – kąt położenia lotek i kąt przechylenia samolotu (rys. 9) oraz prędkości katowe przechylenia i odchylenia samolotu (rys. 10). Maksymalne kąty położenia lotek osiągają wartość 15° , co stanowi ich graniczne pozycje. Ze względów na bezpieczeństwo lotu starano się utrzymywać wartości parametrów na poziomie zapewniającym stabilność ruchu samolotu. Z tego powodu kąt przechylenia (rys. 9) nie przekraczał 40° .



Rys. 9. Przebieg położenia kąowego lotek i kąta przechylenia samolotu w czasie wykonywania manewru antykolizyjnego z zakretem $\Delta\Psi = 87,3^\circ$
 Fig. 9. Transient of ailerons' angular position and roll angle during anti-collision manoeuvre with turn $\Delta\Psi = 87,3^\circ$



Rys. 10. Przebieg prędkości kątowej przechylenia o odchylenia w czasie wykonywania manewru antykolizyjnego z zakretem $\Delta\Psi = 87,3^\circ$
 Fig. 10. Transient of roll and yaw components of angular velocity during anti-collision manoeuvre with turn $\Delta\Psi = 87,3^\circ$

7. Wnioski

Przedstawiony materiał pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- Uzyskanie sensownych wyników optymalizacji przebiegu trajektorii manewru antykolizyjnego zależało od wyboru właściwego wskaźnika jakości.
- W procesie formułowania wskaźnika jakości istotne są kryteria i uszeregowanie ich ważności.
- Zaproponowana metodyka może zostać wykorzystana do badania różnych manewrów omijania ruchomych przeszkód, wykonywanych przez samolot lub inne podobne obiekty latające.

Przedstawiona metoda wymaga dalszych badań poszerzających obszar poszukiwań, m.in. przez zwiększenie liczby parametrów trajektorii manewru antykolizyjnego uwzględnionych w procesie optymalizacji. Dalsze badania nad optymalizacją trajektorii manewru antykolizyjnego powinny dotyczyć analizy zachowania wskaźnika jakości z uwzględnieniem dodatkowych składników.

Bibliografia

1. Balicki J., Kitowski Z., *Evolutionary algorithms for navigation of underwater vehicle*, Proceedings of the Second International Workshop on Robot Motion and Control IEEE, 103–108, October 2001, Bukowy Dworek, DOI:10.1109/ROMOCO.2001.973439.
2. Falkiewicz D., Łukasik S., *Fuzzy modeling with the particle swarm optimization algorithm*, "Technical Transactions Automatic Control", Vol. 25, 2012, 41–54, DOI: 10.4467/2353737XCT.14.004.1781.
3. Graffstein J., *Functioning of an air anti-collision system during the test flight*, "Journal Aviation", Vol. 18, 2014, 44–51, DOI: 10.3846/16487788.2014.865945.
4. Graffstein J., *Dobór parametrów manewru antykolizyjnego i jego przebieg*, "Prace Instytutu Lotnictwa", Nr 3 (224), 2012, 31–43.
5. Graffstein J., *Elementy procesu wykrycia zagrożenia kolizją i automatycznie sterowany manewr awaryjny*, "Pomiary Automatyka Robotyka", R. 16, Nr 2/2012, 383–387.

6. 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: 10.1007/978-3-319-29-357-8.
7. Hassan R., Cohanim B., de Weck O., Venter G., *A comparison of particle swarm optimization and the genetic algorithm*, Structures, Structural Dynamics, and Materials and Co-located Conferences, Austin, 2015, 1–13, DOI: 10.2514/6.2005-1897.
8. Jung T., Piera M.A., Ruiz O.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.
9. Kwok N.M., Ha1 Q.P., Fang G., *Motion coordination for construction vehicles using swarm intelligence*, "International Journal of Advanced Robotic Systems", Vol. 4, No. 4, 2007, 469–476, DOI: 10.5772/5672.
10. Lisowski J., *The sensitivity of state differential game vessel traffic model*, "Polish Maritime research", Vol. 23, No. 2, 2016, 14–18, DOI: 10.1515/pomr-2016-0015.
11. Masehian E., Sedighzadeh D., *Multi-objective robot motion planning using a particle swarm optimization model*, "Journal of Zhejiang University-SCIENCE C" (Computers & Electronics), No. 11, 2011, 607–619.
12. 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.
13. Reshamwala A., Vinchurkar D.P., *Robot path planning using an ant colony Optimization Approach: A Survey*, "International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence", Vol. 2, No. 3, 2013, 65–71, DOI: 10.14569/IJARAI.2013.020310.
14. Singh Pal N., Sharma S., *Robot path planning using swarm intelligence: A Survey*, "International Journal of Computer Applications", Vol. 83, No. 12, 2013, 5–12.
15. Stevens B.L., Levis F.L., *Aircraft control and simulation*. J. Wiley & Sons, Inc., 2016.
16. Yarmohamadi M., *Improvement of robot path planning using particle swarm optimization in dynamic environments with mobile obstacles and target*, "Advanced Studies in Biology", Vol. 3, No. 1, 2011, 43–53.

A method of optimal flight trajectory synthesis for an anti-collision manoeuvre performed within a neighbourhood with moving obstacles

Abstract: For solving the airplane to obstacle collision avoidance problem two methods are necessary: one, for detecting a collision threat, and the other one, for synthesizing a safe manoeuvre avoiding threatening obstacles. In the article a method for detecting a threat of collision to obstacle was presented for the case of many obstacles moving within the neighbourhood of the airplane. Methods for optimal anti collision trajectory synthesis and for proving the workability of such a result were proposed too. A solution of an optimisation problem, obtained by the Swarm of Particles Optimization was used for trajectory synthesis. A form of quality index was proposed for this task and the analyses of its behaviour for several values of weighting factors were presented. Results of simulations of flight along an optimal, anti collision manoeuvre trajectory proved that such a manoeuvre is workable.

Keywords: collision avoidance, flight trajectory, evasive manoeuvre, numerical simulation, particle swarm optimization (PSO)

dr inż. Jerzy Graffstein

jerzy.graffstein@ilot.edu.pl

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.

