

Definicja i analiza wskaźnika stopnia zagrożenia bezpieczeństwa lotu samolotu wzdłuż optymalnej trajektorii omijania ruchomych przeszkód

Jerzy Graffstein

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa, Centrum Technologii Bezzałogowych, Al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa

Streszczenie: Zapewnienie bezpiecznego unikania kolizji z ruchomymi przeszkodami w czasie lotu wymaga przeprowadzenia kilkietapowych działań. W ich zakresie jest wykrycie przeszkód, zidentyfikowanie możliwości potencjalnych kolizji, wyliczenie bezpiecznej trajektorii lotu, która ma na celu ominięcie przeszkód. Istotne jest wykonanie analizy wyliczonej trajektorii pod względem jej bezpiecznej realizacji. W pracy przedstawiono sposób, w jaki wykonywana jest analiza bezpieczeństwa omijania przeszkód za pomocą zaproponowanego wskaźnika. Omówiono sposób sformułowania tego wskaźnika oraz jego wykorzystanie na etapie przygotowania i realizacji trajektorii omijania przeszkód. Obliczenia trajektorii przeprowadzono rozwiązując zagadnienie optymalizacji metodą roju cząstek (PSO). Bezpieczeństwo uzyskanych w ten sposób przykładowych manewrów opisywały wyliczone przebiegi wskaźnika stopnia zagrożenia bezpieczeństwa.

Słowa kluczowe: unikanie kolizji, trajektoria manewru antykolizyjnego, bezpieczeństwo omijania przeszkód, optymalizacja roju cząstek, PSO

1. Wprowadzenie

Wśród wielu różnych zagrożeń występujących w czasie lotu samolotu istnieje niebezpieczeństwo kolizji z jedną lub więcej spośród ruchomych przeszkód występujących w otoczeniu samolotu. Rozważania dotyczące omijania ruchomych przeszkód powinny uwzględniać szybkie 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 lotnictwie pasażerskim kontrola ruchu lotniczego ATM (ang. *Air Traffic Management*) wykorzystuje do tego urządzenie pozwalające na wykrycie samolotów na dużych odległościach, a kontrolerzy obsługi naziemnej mogą korzystać z oprogramowania do wyliczania (szacowania) prawdopodobieństwa konfliktów i kolizji [13]. Istotną kwestią, która powinna podlegać szczegółowej analizie, jest bezpieczeństwo wykonania manewrów antykolizyjnych. Z tego powodu kształt trajektorii manewru

antykolizyjnego oraz sposób jego wykonania podlegają różnym ograniczeniom w zależności od wartości zmiennych stanu lotu samolotu. Stanowi to zagadnienie odwrotne z analogicznymi elementami do problemu przechwytywania przez rakietę lecącego obiektu [9]. Do istotnych parametrów podlegających wspomnianym ograniczeniom, dla których należy uwzględnić dopuszczalne zakresy należą między innymi: prędkość zakrętu (promień zakrętu) [4, 5] oraz prędkość poruszania się samolotu po trajektorii. W procesie optymalnego wyboru kształtu trajektorii samolotu uwzględniono wymienione ograniczenia. Z drugiej strony konieczne jest zapewnienie maksymalnie dokładne wykonanie zaplanowanej misji, w tym realizacja przebiegu założonej trajektorii. Te często sprzeczne ze sobą uwarunkowania i cele powinny być uwzględnione w procesie optymalizacji omijania przeszkód. Związany z tym kompromis powoduje konieczność wykonania ostatecznej oceny wyliczonej trajektorii omijania przeszkód pod kątem bezpieczeństwa.

W pracy zaproponowano przeprowadzenie oceny wyliczonej trajektorii na podstawie wskaźnika bezpieczeństwa uwzględniającego zaproponowane w pracy elementy. Bezpieczeństwo wyliczonej trajektorii zależy od sposobu sformułowania wskaźnika jakości. Dostępna literatura uwzględnia w nim często odległość od punktu docelowego [12, 15], odległości od przeszkód [1, 11], odległość od wcześniej zadanej trasy, rzadziej wartość zmiany kąta wektora prędkości ruchomego obiektu [12] lub zużycie paliwa [16]. Spośród opisanych w publikacjach algorytmów optymalizacji wykorzystuje się techniki sztucznej inteligencji, do których między innymi należą: ewolucyjne [1], genetyczne [7], gier [11], roju mrówek [15, 17], roju pszczół [17]. W pracy wybrano algorytm roju cząstek PSO (ang. *Particle Swarm Optimization*) [2, 7, 10, 12, 17, 19].

Autor korespondujący:

Jerzy Graffstein, Jerzy.Graffstein@ilot.lukasiewicz.gov.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 29.11.2024 r., przyjęty do druku 16.04.2025 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Int.

4. Optymalizacja trajektorii omijania przeszkód

Wskaźnik jakości stanowiący podstawę optymalizacji trajektorii manewru antykolizyjnego jest kompromisem między dwoma sprzecznymi celami: najmniejszymi zmianami realizowanej trasy w stosunku do zaplanowanej oraz zapewnieniem największego bezpieczeństwa lotu samolotu. Jednoczesne osiągnięcie wymienionych celów będzie możliwe, gdy wskaźnik jakości będzie uwzględnił następujące kwestie:

- 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.
- Minimalizowanie wydłużenia trasy lotu spowodowane wykonaniem manewru antykolizyjnego w stosunku do zaplanowanej trasy.

Zgodnie wymienionymi wskazaniem przyjęto następującą formę wielokryterialnej funkcji celu inaczej nazywanej wielokryterialnym wskaźnikiem jakości J_{Opt} wykorzystanej do wyliczenia optymalnej trajektorii omijania przeszkód, w której kolejne wyrazy odpowiadają wymienionym kolejno powyżej czterem kwestiom:

$$J_{Opt} = \sum_{i=1}^{i=np} \frac{wsp_1}{|r_{SPi} - r_{CMBi}|} + \sum_{i=1}^{i=np} \frac{wsp_2}{r_{SPi}} + \sum_{j=1}^{j=np} wsp_3 \left(\sqrt{(x_{1Sj} - x_{ij})^2 + (y_{1Sj} - y_{ij})^2} \right) + wsp_4 (S_R - S_p) \quad (5)$$

gdzie

$$r_{SPi} \leq r_{CMBi} \Rightarrow \frac{wsp_1}{|r_{SPi} - r_{CMBi}|} = 10^9, \quad (6)$$

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_{ij} , y_{ij} – współrzędne punktu leżącego na zaplanowanej trasie najbliższego od aktualnego położenia samolotu (położenia jego środka masy x_{1Sj} , y_{1Sj}); np – liczba rozpatrywanych punktów na poszukiwanej trajektorii.

W zaproponowanym wskaźniku jakości (5) dwa pierwsze elementy są odpowiedzialne za bezpieczeństwo lotu. Trzeci i czwarty reprezentują kryterium jakości wykonania zadania i związane z nim kryterium ekonomiczne.

Określenie wartości współczynników wagowych wsp_i przeprowadzono na drodze eksperymentalnej w kolejnych iteracjach. Starano się uzyskać względną równowagę między poszczególnymi składowymi wskaźnika jakości za wyjątkiem pierwszego, który jest odpowiedzialny za zachowanie założonej minimalnej odległości od przeszkody. Współczynnik wagowy wsp_1 wybrano na poziomie powodującym wzrost wspomnianego składnika powyżej średniej sumy pozostałych składników.

Optymalizację trajektorii manewru antykolizyjnego wykonano korzystając z procedury algorytmu optymalizacji roju cząstek PSO zgodnie z opisanym wcześniej wskaźnikiem jakości (5). Metoda PSO jest efektywna przy wyliczaniu globalnego ekstremum dla funkcji wielu zmiennych. Do optymalizacji trajektorii wybrano wszystkie cztery, wcześniej wymienione, parametry charakteryzujące jej przebieg: Ψ_i , tpr , ω , ω_z , tst .

Procedura optymalizacji roju cząstek jest inspirowana zachowaniem żywych organizmów, które w tej metodzie reprezentowane są przez ruchome cząstki. Sposób ich poruszania jest zdeterminowany jest przez podane dalej zależności, co pozwala na znalezienie optymalnej wartości założonej funkcji celu (5). Algorytm PSO rozpoczyna działanie od zainicjowania w sposób losowy położenia cząstek.

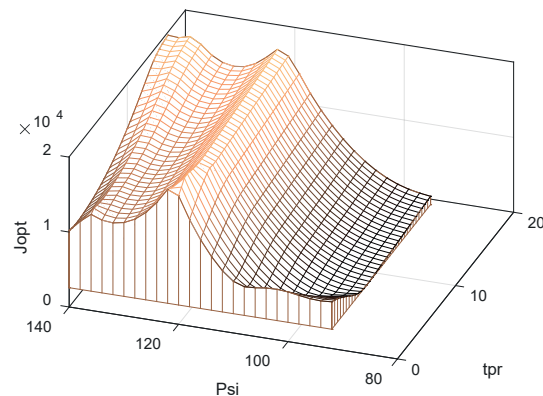
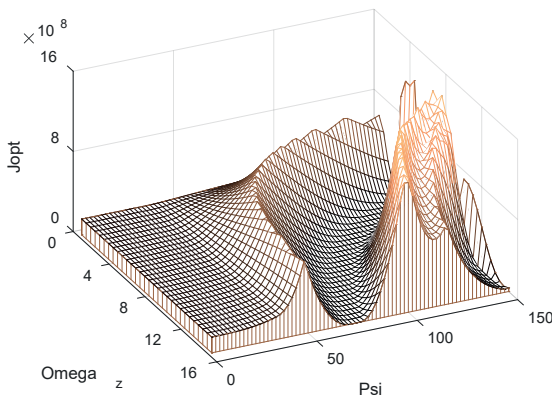
W kolejnych iteracjach aktualizacja prędkości cząstek odbywa się według następującej zależności [7, 11]:

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + c_1 r_1 (x_{i_best}(t) - x_i(t)) + c_2 r_2 (x_{g_best}(t) - x_i(t)) \quad (7)$$

gdzie: x_i – aktualne położenie i -tej cząstki; x_{i_best} – najlepsza pozycja znaleziona przez i -tą cząstkę w k -tej iteracji; x_{g_best} – najlepsza pozycja znaleziona spośród wszystkich cząstek w k -tej iteracji; r_1 , r_2 – liczby losowe z przedziału $[0, 1]$, zapewniające różnorodności roju; c_1 , c_2 – współczynniki o najczęściej stałych wartościach, określają wpływ poszczególnych składników aktualizacji prędkości; c_1 odpowiedzialny za zachowanie cząstki (tzw. współczynnik *osobniczy*) w przedziale od 1,5 do 2,0 oraz c_2 odpowiedzialny za zachowanie roju (tzw. współczynnik *socjalny*) w przedziale od 2,0 do 2,5; w – współczynnik inercji o wartości stałej [19] z przedziału 0,4 do 1,4.

Nowe położenie i -tej cząstki o wektorze prędkości zgodnym z zależnością (6) wyliczane jest z zależności [7, 11]:

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



Rys. 3. Przykładowe przebiegi wskaźnika jakości dla wybranych parametrów trajektorii
Fig. 3. Examples of quality indicator curves for selected trajectory parameters

5. Wskaźnik stopnia zagrożenia bezpieczeństwa lotu podczas omijania przeszkód

Wskaźnik W_{skN} stopnia zagrożenia bezpieczeństwa wynika z aktualnej sytuacji podczas lotu oraz trudności i niebezpieczeństw podczas wykonywania skutecznego manewru omijania ruchomych i nieruchomych przeszkód. Zawiera różne składniki wyrażone wielkościami fizycznymi i stanowi sumaryczną miarę różnych rodzajów niebezpieczeństw o różnym stopniu intensywności związanych z unikaniem kolizji. Celem podjęcia próby sformułowania wskaźnika jest potrzeba dostarczenia pilotowi (lub operatorowi) ilościowej informacji o konieczności i intensywności podjęcia środków ostrożności i czasu ich podjęcia w trakcie wykonywanego lotu. Wymagane środki ostrożności to między innymi skupienie uwagi na określonych przyrządach pokładowych, obserwacja otoczenia oraz rezygnacja z wykonywania innych czynności oraz manewrów niezwiązanych z omijaniem przeszkód.

Wskaźnik W_{skN} zależy od stanu lotu samolotu oraz zachowania się przeszkód w jego otoczeniu. Wcześniejsze doświadczenia autora dotyczące zagadnień związanych z omijaniem ruchomych przeszkód wskazują, że W_{skN} powinien uwzględniać następujące parametry kinematyczne:

1. Prędkość zbliżania samolotu do ruchomych przeszkód – V_{SPi} ,
2. Odległości między samolotem a przeszkodami – r_{SPi} ,
3. Liczba ruchomych przeszkód znajdujących się w przyjętym otoczeniu samolotu – nr ,
4. Szybkość poruszania się przeszkód – V_{Pi} ,
5. Szybkość zmian kierunku przemieszczania się przeszkód – ω_{Pzi} , jeśli takie zmiany występują,
6. Błędy estymacji ruchu przeszkód i zmian kierunku tego ruchu – $\Delta\omega_{Pzi}$, jeśli takie są znane lub wyliczane.

Proponowaną matematyczną formę wskaźnika W_{skN} uwzględniającą wymienione parametry od pkt 1 do pkt 5, opisuje zależność (9):

$$W_{skN} = wsg_1 \sum_{i=1}^{i=nr} |V_{SPi}|^{nw} / r_{SPi} + wsg_2 \sum_{i=1}^{i=nr} |V_{Pi}| / r_{SPi} + wsg_3 nr + wsg_4 \sum_{i=1}^{i=nr} |\omega_{Pzi}| / r_{SPi} \quad (9)$$

Formuła wskaźnika bezpieczeństwa wymaga zachowania odpowiednich proporcji między poszczególnymi jego składnikami w celu uzyskania odpowiedniego wpływu poszczególnych elementów na wartość wskaźnika. Uzyskano to wprowadzając odpowiednie współczynniki wagowe wsg_i mnożone przez te składniki. Wartości współczynników wagowych uzyskano metodą eksperymentalną w czasie symulacji manewrów omijania przeszkód i nadano im następujące wartości $wsg_1 = 0,7$, $wsg_2 = 0,9$, $wsg_3 = 0,5$, $wsg_4 = 150$. W pierwszym składniku zależności (9) prędkość zbliżania V_{SPi} jest podniesiona do potęgi $nw = 1,5$. Dla

$$r_{SPi} > r_{SPi\max} \Rightarrow wsg_i = 0 \quad \wedge \quad \dot{r}_{SPi} > 0 \Rightarrow wsg_i = 0 \quad (10)$$

gdzie $r_{SPi\max}$ jest przyjętą wartością maksymalnej odległości i -tej przeszkody, dla której uwzględniana jest przeszkoda.

W ten sposób definiowana jest granica rozpatrywanego otoczenia samolotu. Wartość współczynnika wagowego wsg_1 jest zerowa, gdy samolot oddala się od przeszkody, czyli spełniona jest druga część warunku $\dot{r}_{SPi} > 0$ (10) opisująca zachowanie pierwszej pochodnej odległości samolotu od przeszkody.

Jeśli porównywane są wartości wskaźnika dla różnych samolotów, pomocne jest uwzględnienie manewrowości każdego z nich.

W rozważanym przypadku będzie to osiągalna największą prędkość kątowną zmiany kierunku ruchu samolotu. Odległość r_{SPi} pełni szczególną rolę, ponieważ stanowi odniesienie dla wielkości składników omawianego wskaźnika. Wzrost r_{SPi} powoduje spadek udziału tego elementu w wartości W_{skN} . Pośrednio wpływ na wskaźnik ma również przyjęta najmniejsza dopuszczalna separacja między samolotem i ruchomą przeszkodą.

Po wyliczeniu trajektorii omijania ruchomych przeszkód możliwe jest wyznaczenie przebiegu wartości wskaźnika W_{skN} zgodnie z zależnościami (9) i (10). Udostępnienie W_{skN} pilotowi (operatorowi) przed i podczas realizacji tej fazy lotu może stanowić dla niego cenną informację pozwalającą na oszacowanie, w których przedziałach czasu przewidywane jest największe zagrożenie bezpieczeństwa lotu. Istotnym zagadnieniem niewchodzącym w zakres tej pracy jest zaprojektowanie graficznej prezentacji tej informacji.

Należy przewidzieć sytuację, w której maksymalna wartość W_{skN} jest na tyle duża, że nie jest ona do zaakceptowania i wówczas wyliczany jest ponownie przebieg trajektorii omijania przeszkód z wprowadzoną korektą minimalnej separacji, polegającą na zwiększeniu jej wartości. Oszacowanie wartości W_{skN} powyżej której wyznaczony przebieg trajektorii omijania jest nieakceptowalny wymaga przeprowadzenia wielu symulacji oraz i badań w locie w trakcie omijania przeszkód.

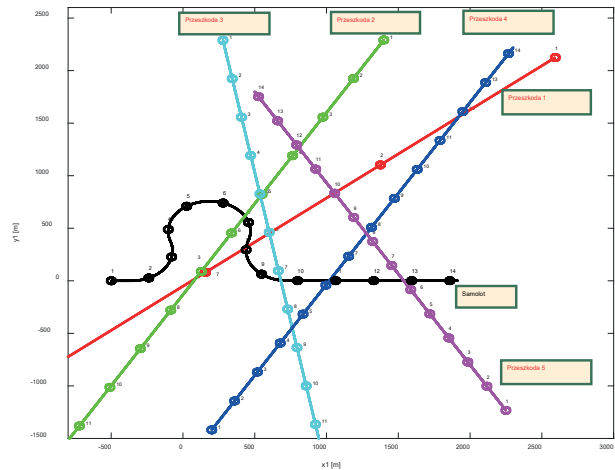
6. Wyniki obliczeń przebiegów wskaźnika stopnia zagrożenia na podstawie optymalnych trajektorii omijania przeszkód

Do obliczeń optymalnej trajektorii omijania przeszkód i wskaźnika przyjęto matematyczny model samolotu typu I-23 Manager [18]. Samolot we wszystkich przykładowych scenariuszach poruszał się na stabilizowanej wysokości 200 m i ze stałą prędkością liniową względem Ziemi 50 m/s.

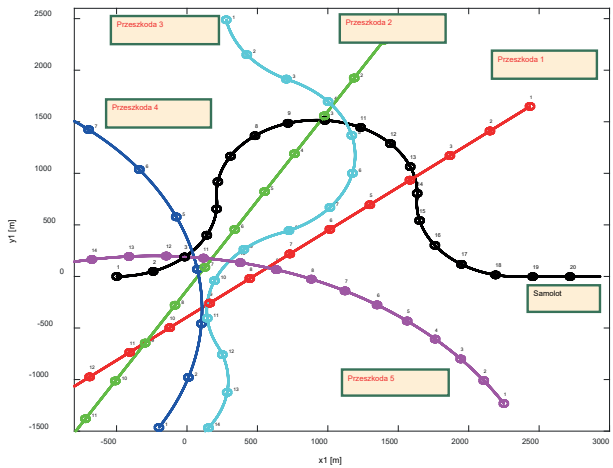
Do dalszych rozważań zaproponowano trzy scenariusze charakteryzujące się podwyższonym zagrożeniem bezpieczeństwa lotu ze względu na dużą prędkość przemieszczania się przeszkód lub zmianę kierunku ruchu. Wszystkie znajdowały się na stałej wysokości, tej samej co samolot i leciały ze stałą prędkością co do modułu ale, wartość ta dla każdej z nich była inna. W scenariuszu *Sc1* dwie przeszkody przemieszczały się z prędkościami 160 m/s i 180 m/s, czyli znacznie większą niż prędkość samolotu. Pozostałe prędkości przeszkód zawierały się w przedziale od 50 m/s do 70 m/s. W scenariuszu *Sc2* prędkość lotu jednej przeszkody była jeszcze większa niż w *Sc1* i wynosiła 300 m/s, a pozostałe zawierały się w przedziale od 50 m/s do 80 m/s. W scenariuszu *Sc3* w przeciwieństwie do poprzednich dwie przeszkody zmieniały kierunek ruchu, pozostałe tak jak w *Sc1* i *Sc2* miały stałe kierunki ale, różniące się między sobą. W scenariuszu *Sc3* prędkości przeszkód mieściły się w przedziale od 50 m/s do 100 m/s.

Przyjęto, że minimalna odległość samolotu od wszystkich przeszkód nie powinna być mniejsza niż 270 m oraz maksymalna prędkość kątowna zakrętu jest nie większa niż $10^\circ/s$. W wyniku działania oprogramowania stosującego procedurę PSO uzyskano przedstawione na wykresach (rys. 4, rys. 5 i rys. 6) kształty optymalnych trajektorii lotu samolotu w czasie omijania ruchomych przeszkód dla wybranych trzech scenariuszy.

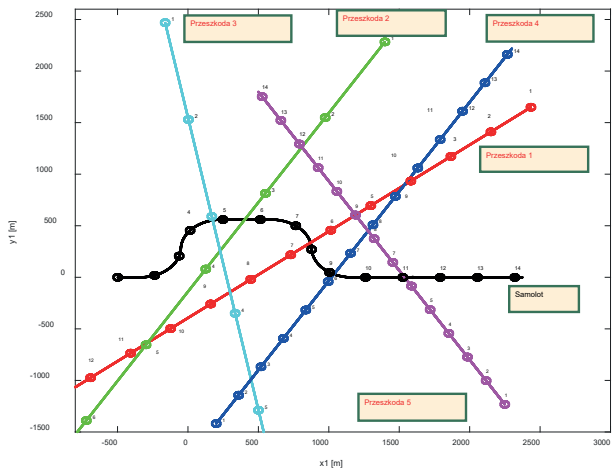
Wartości parametrów opisujących optymalne przebiegi trajektorii manewrów antykolizyjnych zamieszczono w Tabeli 1. Wynika z niej, że tylko dla scenariusza *Sc3* nie istnieje prostoliniowy fragment trajektorii *tpr*. W scenariuszu *Sc2* odcinek *tpr* jest znacznie krótszy od *tpr* w *Sc1*. Trajektorie dla wszystkich scenariuszy charakteryzują się dużymi, maksymalnymi kątami odchylenia, którego wartość dla *Sc1* i *Sc3* różniła się o kilka stopni od 90° , a dla *Sc2* przekroczyła 100° o niecałe 8° . Kolejne



Rys. 4. Optymalna trajektoria samolotu i ruch pięciu przeszkód dla Scenariusza Sc1
Fig. 4. Optimal aircraft trajectory and five obstacle movement for Scenario Sc1



Rys. 6. Optymalna trajektoria samolotu i ruch pięciu przeszkód dla Scenariusza Sc3
Fig. 6. Optimal aircraft trajectory and five obstacle movement for Scenario Sc3



Rys. 5. Optymalna trajektoria samolotu i ruch pięciu przeszkód dla Scenariusza Sc2
Fig. 5. Optimal aircraft trajectory and five obstacle movement for Scenario Sc2

zakręty samolotu w czasie omijania przeszkód dla scenariuszach Sc1 odbywały się z podobną prędkością kątową jak dla scenariusza Sc2. Znajomość sposobu zmian ruchu przeszkód umożliwiła wyliczenie trajektorii ich omijania dla Sc3 (rys. 6). Jej przebieg wyraźnie różnił się od poprzednich trajektorii – zakręty były wykonywane ze znacznie mniejszą prędkością kątową. Jej kształt, a w tym duże odchylenia od zaplanowanej wcześniej trasy (rys. 6) wskazuje na trudniejsze zadanie w porównaniu ze scenariuszami Sc1 i Sc2. Jednocześnie jak pokazuje przebieg wskaźnika W_{skN} scenariusz Sc3 wiąże się z większymi zagrożeniami wynikającymi ze zmian kierunku ruchu dwóch przeszkód.

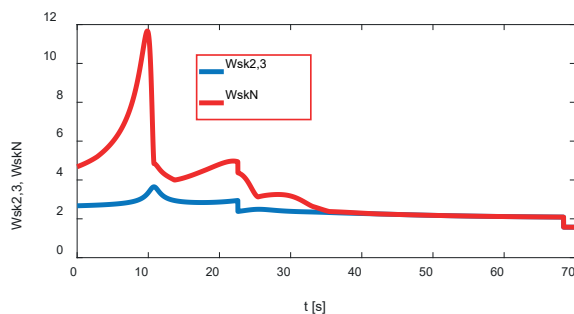
Jego wartość maksymalna i średnia są większe niż dla pozostałych scenariuszy.

Dla Sc1 i Sc2 maksymalne wartości wskaźnika W_{skN} występują dla czasu ok. 10 s, a stały niski poziom $W_{skN} = \sim 2$ zaczyna się od czasu ok. 40 s. Dla Sc3 maksimum wartości jest znacznie później czyli ok. 43 s, a w przybliżeniu stała niska wartość zaczyna się po czasie ok. 52 s (rys. 8). Wynika z tego, że pilot lub operator powinien w warunkach scenariusza Sc3 dłużej i mocniej skupiać uwagę w trakcie omijania przeszkód. Na wykresie (rys. 8) widoczne jest znaczący udział zagrożenia pochodzący od zmiany kierunku ruchu porównując całkowity wskaźnik W_{skN} do sumy pozostałych składników W_{sk1-3} , nie zawierających zmiennej ω_{Pzi} . Dla Sc1 i Sc2 składnik we wskaźniku W_{skN} (9) zawierający prędkość zbliżania samolotu do przeszkody V_{SPzi} jest pierwszym dominującym. Potwierdzeniem jest porównanie całego wskaźnika W_{skN} z sumą pozostałych jego elementów W_{sk2-3} nie zawierających V_{SPzi} (oba wykresy na rys. 7). Analiza wykresów W_{skN} (rys. 7) zgodnie z przewidywaniami wskazuje na wzrost zagrożenia wraz z większą prędkością liniową przeszkody. Świadczy o tym maksymalna wartość W_{skN} dla Sc2 wynosząca 11,67 w porównaniu z mniejszą dla Sc1 wynoszącą 9,43. Przebieg zmian odległości r_{SPi} w czasie wykonywania manewrów omijania pokazuje przekroczenie odległości od samolotu niektórych przeszkód poza przyjętą w tej pracy granicę $r_{SPimax} > 4$ km (rys. 9 i 10). Wspomniana granica wynika z przyjętego w pracy pomiarowego zasięgu urządzeń zbierających informacje o przeszkodach. Odzwierciedleniem tego faktu jest dwukrotnie skokowe zmniejszenie wartości wskaźnika W_{skN} widoczne na jego wykresach na rys. 8 w czasie ok. 52 s i ok. 68 s oraz na rys. 7 dla Sc2 w czasie ok. 69 s. Wynika to z pomijania po tym czasie wpływu takiej przeszkody na wartość W_{skN} . Co uzasadnia założenie, że w tej odległości istnienie przeszkody nie wpływa znacząco na bezpieczeństwo lotu.

Tab. 1. Wyniki obliczeń optymalnej trajektorii i wskaźnika stopnia zagrożenia bezpieczeństwa dla scenariusza: Sc1, Sc2 i Sc3

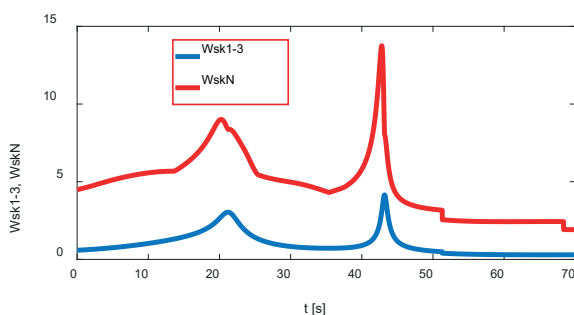
Tab. 1. Calculation results of the optimal trajectory and the security risk level indicator for scenarios: Sc1, Sc2 and Sc3

Scenariusz	Max kąt odchylenia [°]	Długość prostego odcinka [m]	Czas rozpoczęcia manewru [s]	Prędkość zakrętu [°/s]	Max W_{skN}	Średni W_{skN}
Sc1	88,3	355,4	3,22	9,89	9,43	3,22
Sc2	107,9	3,85	2,82	9,26	11,67	3,46
Sc3	93,7	0,0	0,0	4,02	13,75	4,75



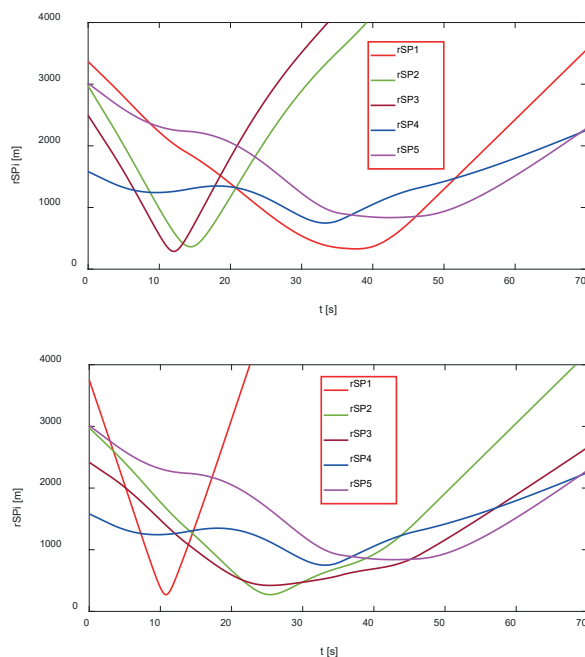
Rys. 7. Wskaźnik W_{skN} i $W_{sk2,3}$ stopnia zagrożenia bezpieczeństwa dla Scenariuszy: Sc1 i Sc2

Fig. 7. The W_{skN} and $W_{sk2,3}$ indicators of the level of security risk for Scenarios: Sc1 and Sc2



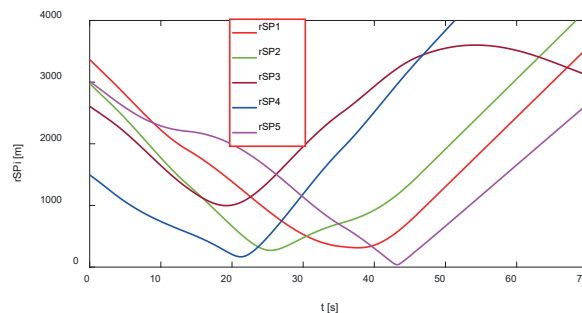
Rys. 8. Wskaźnik W_{skN} i W_{sk1-3} stopnia zagrożenia bezpieczeństwa dla scenariusza Sc3

Fig. 8. The W_{skN} and W_{sk1-3} indicators of the level of security risk for the Sc3 scenario



Rys. 9. Odległości samolotu od przeszkód dla scenariuszy: Sc1 i Sc2

Fig. 9. Distances of the aircraft from obstacles for scenarios: Sc1 and Sc2



Rys. 10. Odległości samolotu od przeszkód dla scenariusza: Sc3

Fig. 10. Distances of the aircraft from obstacles for scenario: Sc3

7. Wnioski

Przedstawiony materiał pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- Uzyskano zadawalające wyniki optymalizacji trzech przebiegów trajektorii omijania przeszkód w wyniku właściwego wyboru wskaźnika jakości i odpowiednio dobranego algorytmu optymalizacji.
- W procesie formułowania wskaźnika W_{skN} stopnia zagrożenia bezpieczeństwa starano się uwzględnić najistotniejsze czynniki wpływające na tworzony obraz zagrożeń w czasie lotu.
- Przedstawione wyniki wstępnych, symulacyjnych obliczeń wskaźnika W_{skN} dla zaproponowanych przykładowych scenariuszy w czasie omijania ruchomych przeszkód świadczą o dobrej reprezentacji zmian zagrożeń dla wybranych sytuacji.

W celu uzyskania większej pewności dotyczącej użyteczności zaproponowanej formuły wskaźnika W_{skN} niezbędne będą dalsze badania symulacyjne, u podstaw których, między innymi będą leżały realne warunki jakie uda się zaobserwować w czasie lotu rzeczywistych obiektów omijających ruchome przeszkody. Przewiduje się, że rozszerzenie działania omawianego wskaźnika może polegać na uwzględnieniu niepewności związanej z niedokładną znajomością ruchu przeszkód, a także na występowaniu błędów pomiarowych stanu lotu samolotu, przyjmując, że możliwe będzie uzyskanie ich np. na drodze estymacji.

Bibliografia

1. Kanakakis V., Tsourveloudis N., *Evolutionary path planning and navigation of autonomous underwater vehicles*, Mediterranean Conference on Control & Automation, 2007, Athens, DOI: 10.1109/MED.2007.4433919.
2. Falkiewicz D., Łukasik S., *Fuzzy modeling with the particle swarm optimization algorithm*, „Czasopismo Techniczne. Automatyka”, Vol. 25, 2012, 41–54, DOI: 10.4467/2353737XCT.14.004.1781.
3. 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.
4. Graffstein J., *Dobór parametrów manewru antykolizyjnego i jego przebieg*, „Prace Instytutu Lotnictwa”, Nr 224, 2012, 31–43.
5. Graffstein J., *Elementy procesu wykrycia zagrożenia kolizją i automatycznie sterowany manewr awaryjny*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, 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 Auto-

- mation, Robotics and Measurement Techniques”, Vol. 440, 2016, 127–139, DOI: 10.1007/978-3-319-29357-8_12.
7. Hassan R., Cohanin 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, 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. Krzysztofik I., Koruba Z., *Application of an optimal control algorithm for a gyroscope system of a homing air-to-air missile*, “Aviation”, Vol. 25, No. 1, 2021, 41–49, DOI: 10.3846/aviation.2021.13899.
 10. Kwok N.M., Ha 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.
 11. 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.
 12. Masehian E., Sedighzadeh D., *Multi-objective robot motion planning using a particle swarm optimization model*, “Journal of Zhejiang University SCIENCE C (Computers & Electronics)”, Vol. 11, 2010, 607–619, DOI: 10.1631/jzus.C0910525.
 13. Mitici M., Blom H.A.P., *Mathematical Models for Air Traffic Conflict and Collision Probability Estimation*, “IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems”, Vol. 20, No. 3, 2019, 1052–1068, DOI: 10.1109/TITS.2018.2839344.
 14. 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.
 15. 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.
 16. Salazar L.R., Sabatini R., Gardi A., Ramasamy S., *A Novel system for non-cooperative UAV sense-and-avoid*, International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2016, 1–11.
 17. Singh N.P., Sharma S., *Robot path planning using swarm intelligence: A Survey*, “International Journal of Computer Applications”, Vol. 83, No. 12, 2013, 5–12, DOI: 10.5120/14498-2274.
 18. Stevens B.L., Levis F.L., *Aircraft control and simulation*, Wiley & Sons, 2016.
 19. 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.

Definition and Analysis of the Indicator of the Degree of Risk to the Safety of an Aircraft Flight Along the Optimal Trajectory for Avoiding Moving Obstacles

Abstract: Ensuring safe avoidance of collisions with moving obstacles during flight requires carrying out several-stage activities. Their scope includes detecting obstacles, identifying the possibilities of potential collisions, calculating a safe flight trajectory, which is aimed at avoiding obstacles. It is important to perform an analysis of the calculated trajectory in terms of its safe implementation. The paper presents the method of performing the analysis of the safety of avoiding obstacles using an indicator. The method of formulating this indicator and its use at the stage of preparing and implementing the trajectory of avoiding obstacles is discussed. The calculations of the trajectory were carried out by solving the problem of particle swarm optimization (PSO). The safety of the example maneuvers obtained in this way was described by the calculated courses of the safety risk level indicator.

Keywords: collision avoidance, flight trajectory, safety of avoiding obstacles, particle swarm optimization, PSO

dr hab. inż. Jerzy Graffstein

Jerzy.Graffstein@ilot.lukasiewicz.gov.pl

ORCID: 0000-0002-9329-8648

Pracownik Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Lotnictwa. W Zakładzie Awioniki zajmuje stanowisko głównego specjalisty ds. badawczych. Jego zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia modelowania dynamiki ruchu obiektów latających i automatyczne sterowanie takimi obiektami, w tym wykorzystanie ruchu programowego do autonomicznego sterowania lotem wzdłuż zadanej trajektorii, oraz zagadnienia związane z autonomiczną realizacją manewrów antykolizyjnych. Jest autorem monografii nt. autonomicznego omijania przeszkód oraz autorem lub współautorem około stu publikacji w języku polskim i angielskim dotyczących wymienionego obszaru tematycznego.

