

Manewry wykonywane przez samolot podczas omijania ruchomej przeszkody dla wybranych scenariuszy

Jerzy Graffstein

Instytut Lotnictwa, al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa

Streszczenie: W pracy zostały przedstawione zależności między zmiennymi opisującymi relacje zachodzące między samolotem a ruchomą przeszkodą. Sformułowano warunki określające możliwość wystąpienia zagrożenia w postaci kolizji. Drugim istotnym celem określenia zmiennych było stworzenie przesłanek do wyboru parametrów manewru antykolizyjnego i położenia samolotu, w którym konieczne jest rozpoczęcie manewru. Przeanalizowano różne scenariusze ruchu samolotu i przeszkody oraz ich wzajemnego usytuowania. Zaproponowano strukturę procesu wyboru parametrów odpowiedniego manewru antykolizyjnego. Rozważania zostały zilustrowane przykładami komputerowej symulacji lotu samolotu w czasie omijania ruchomej przeszkody.

Słowa kluczowe: unikanie kolizji, scenariusze konfliktu, procedury unikania kolizji, numeryczna symulacja dynamika lotu

1. Wprowadzenie

Obecnie obserwuje się dynamiczny rozwój metod wspomagających proces sterowania lotem samolotu. Dotyczy to szczególnie sytuacji zagrożenia bezpieczeństwa lotu. Jednym z istotnych zagrożeń jest kolizja z ruchomą przeszkodą. Trwają intensywne prace zmierzające do stworzenia rozbudowanych systemów antykolizyjnych. Ma to bezpośredni związek ze wzrostem natężenia ruchu obiektów latających oraz przewidywanym wprowadzeniem do eksploatacji obiektów bezpilotowych. Stawiane są coraz większe wymagania odnośnie bezpieczeństwa lotu pilotowanych obiektów.

W dostępnych publikacjach naukowych dotyczących omawianego zagadnienia przedstawiane są elementy strategii unikania kolizji z różnymi przeszkodami [8]. Rozważane są sposoby określenia wykrycia zagrożenia kolizji [1, 6] oraz metody sterowania manewrami omijania przeszkód dla wybranych scenariuszy [5, 9]. Powstające rozwiązania i metody matematycznego podejścia do omawianego zagadnienia różnią się: przyjętymi geometrycznymi reprezentacjami przeszkód, rodzajem obiektu biorącego udział w ruchu, rodzajem przeszkody, sposobem uzyskiwania informacji o przeszkodzie itp.

Bezpieczny manewr antykolizyjny jest to taki ruch obiektu, w którym odległość między dowolnym jego punktem i dowol-

nym punktem przeszkody nie jest mniejsza niż założona wartość określana jako margines bezpieczeństwa r_{CMB} . Jego wartość zależy od szeregu czynników, z których wybrane opisano w publikacjach [3, 4]. Możliwość bezpiecznego uniknięcia kolizji z wcześniej nieznanymi przeszkodami zależy od wielu czynników, w tym przede wszystkim od możliwości manewrowych lecącego obiektu, rozmieszczenia przeszkód, ich wielkości, parametrów ich ruchu, oraz odległości między obiektem a przeszkodą w chwili jej wykrycia, oraz dokładności danych charakteryzujących przeszkodę. Znajomość wspomnianej odległości oraz parametrów ruchu obiektu i przeszkody umożliwiają określenie rodzaju najbardziej odpowiedniego manewru antykolizyjnego i jego parametrów [2, 5, 6]. Szczególnym rodzajem manewru antykolizyjnego jest manewr awaryjny. Jest wykonywany w sytuacji deficytu czasu i przestrzeni w warunkach bliskich granicy możliwości manewrowych obiektu.

Istotnym zagadnieniem jest kształtowanie przebiegu lotu po uniknięciu zderzenia z przeszkodą. Następuje wtedy faza omijania ruchomej przeszkody, a po jej zakończeniu samolot jest sprowadzany do lotu wzdłuż wybranego odcinka trajektorii lub do arbitralnie wybranego punktu. Najczęściej przyjmuje się powrót samolotu do lotu wzdłuż ostatniego odcinka trajektorii najkrótszą drogą lub w najkrótszym czasie.

2. Założenia i sposób kształtowania manewrów antykolizyjnych

W procesie analizy zagrożenia wystąpienia kolizji i przebiegu manewru antykolizyjnego istotne znaczenie ma sposób przyjętej geometrycznej reprezentacji przeszkód, które występują w otoczeniu trajektorii ruchu latającego obiektu. Obiektom ruchomym zwykle nadawane są reprezentację typu: kula, walec

Autor korespondujący:

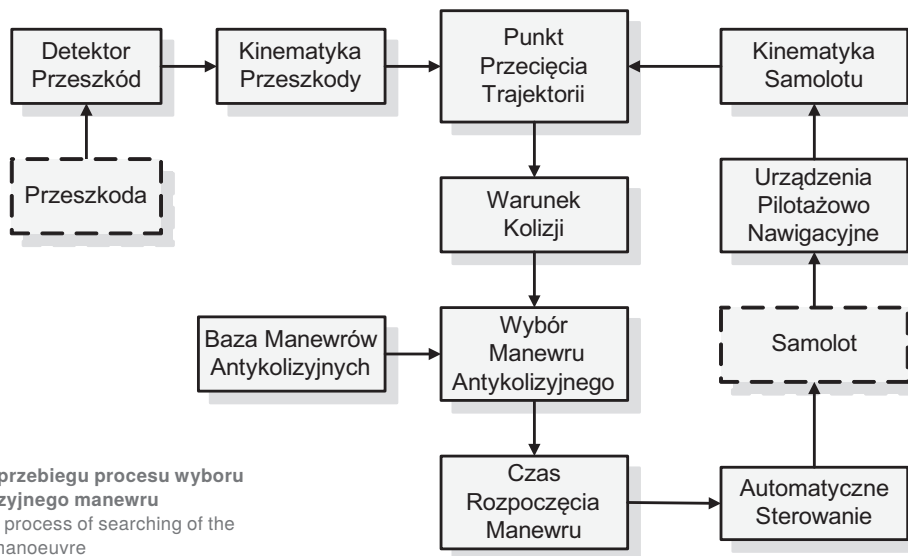
Jerzy Graffstein, jgraff@ilot.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 11.12.2014 r., przyjęty do druku 25.02.2015 r.



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



Rys. 1. Ideowy schemat przebiegu procesu wyboru odpowiedniego antykolidyjnego manewru

Fig. 1. The structure of the process of searching of the appropriate anti collision manoeuvre

lub rzadziej elipsoida [6]. Obiekt ruchomy poruszający się po powierzchni Ziemi lub przemieszczający się nad nią na małej wysokości można zastąpić walcem. Jego podstawa leży na powierzchni Ziemi. Przesądza to o braku możliwości ominięcia wybranego obiektu przez zmniejszenie wysokości i przelot poniżej jego położenia. W celu przeprowadzenia analizy zmiennych kinematycznych do rozmiaru danej geometrycznej figury, reprezentującej przeszkodę, dodawane są wymiar samolotu zagrożonego kolidzją oraz wielkość przyjętego marginesu bezpieczeństwa r_{CMB} . W pracy przyjęto, że przeszkoda jest reprezentowana przez kulę. W dalszej części pracy skupiono się na rozważaniach dotyczących wybranej klasy scenariuszy ruchu obiektów spełniających następujące założenia:

- trajektoria manewru antykolidyjnego jest rozpatrywana w płaszczyźnie poziomej,
- samolot i przeszkoda przed rozpoczęciem omijania nie wykonują żadnych manewrów,
- w czasie omijania przeszkoda nie wykonuje żadnych manewrów,
- ruch samolotu i przeszkody odbywa się na stałych równych sobie wysokościach,
- przemieszczanie się samolotu i przeszkody odbywa się w płaszczyźnie poziomej ze stałymi prędkościami,
- wektory prędkości przeszkody i samolotu mają zbliżoną wartość modułu.

Przyjęto, że wszystkie wielkości kinematyczne samolotu i przeszkody są znane. Omówione w dalszej części pracy scenariusze różnią się między innymi wartościami kąta, pod którym przecinają się trajektorie. Dla omawianych scenariuszy wybrana została klasa manewrów antykolidyjnych. Charakterystyczną ich cechą jest znaczny kąt przechylenia (od 40° do 60°) w celu szybkiego ominięcia przeszkody i powrotu najkrótszą drogą do lotu wzdłuż wcześniej realizowanego odcinka trajektorii. Znacznie większa prędkość przeszkody, w porównaniu do szybkości przemieszczania się samolotu, wymagać będzie innych parametrów manewru antykolidyjnego, między innymi zastosowania zakrętów o innym promieniu.

Analiza różnych scenariuszy, jakie występują podczas zbliżania się samolotu do ruchomej przeszkody, powinna uwzględnić następujące charakterystyczne dane:

- odległość między obiektami,
- kierunek prędkości obiektów,
- wielkość prędkości obiektów,
- kąt przecięcia się trajektorii obiektów.

Ostatnia z wymienionych wielkości wynika z pozostałych. Wszystkie w sposób istotny wpływają na procedurę przygotowania właściwego manewru antykolidyjnego. Ważnym elementem w kształtowaniu manewru antykolidyjnego jest położenie samolotu względem przeszkody w momencie, gdy osiąga ona punkt przecięcia trajektorii P_{PT} . Najbardziej krytycznym przypadkiem jest konfiguracja, w której przy braku manewru antykolidyjnego przeszkoda i samolot osiągną jednocześnie punkt P_{PT} . Wcześniejsze osiągnięcie przez przeszkodę punktu P_{PT} powoduje zwiększenie marginesu bezpieczeństwa przy zachowaniu wybranego manewru antykolidyjnego zgodnie z zasadami podanymi w dalszej części pracy. Gdy przeszkoda znajdzie się później niż samolot w punkcie P_{PT} , to w trakcie manewru omijania wykonywane są skręty w przeciwną stronę, w porównaniu z wcześniej rozważanym manewrem.

3. Proces wyboru odpowiedniego manewru omijania

Przygotowanie i wybór odpowiedniego manewru ominięcia ruchomej przeszkody jest operacją złożoną i stanowi istotny element wspomagania automatycznego sterowania lotem samolotu. W związku z tym zaproponowano strukturę procesu wyboru parametrów odpowiedniego manewru przedstawioną na schemacie (rys. 1). Detektor przeszkód wykrywa przeszkodę i określa jej położenie w przestrzeni oraz wylicza wektor jej liniowej prędkości. Wielkości kinematyczne samolotu są mierzone przez odpowiednie pokładowe urządzenia pilotażowo-nawigacyjne. Na podstawie tych informacji wyliczany jest przybliżony punkt przecięcia trajektorii rozważanych obiektów.

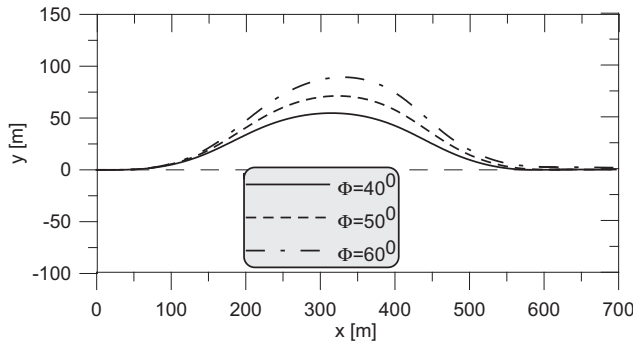
W każdym kroku, w którym następuje odczyt nowych informacji o przeszkodzie dokonywane jest sprawdzenie, czy wykryto nową przeszkodę i czy zaistniało niebezpieczeństwo kolidzji z przeszkodą. Jeśli tak, to wyliczany jest kąt między przecinającymi się trajektoriami i czas osiągnięcia punktu przecięcia P_{PT} przez przeszkodę i samolot. Wybór odpowiedniego manewru z bazy manewrów antykolidyjnych dokonywany jest na podstawie wyliczonego kąta przechylenia samolotu – eksperymentalna zależność (1) dla danych rozmiarów przeszkody i samolotu oraz przyjętego marginesu bezpieczeństwa r_{CMB} . Następnie określany jest właściwy kierunek zakrętu. Ostatnią niezbędną daną do wyznaczenia jest czas uruchomienia manewru antykolidyjnego, po którym następuje jego automatyczne wykonanie.

4. Wybrane parametry manewrów antykolizyjnych

Wybrany manewr omijania ruchomej przeszkody charakteryzuje się określonym kątem przechylenia, który dla wcześniej przyjętej wartości promienia r_{CMB} powinien spełniać warunek:

$$\Phi_Z \geq (r_{CMB} - b_d) / a_d \quad (1)$$

Dla rozważanego typu samolotu (I23 Manager) lecącego z prędkością $V = 50$ m/s użyte współczynniki przyjmują wartości $a_d = 1,73$ i $b_d = -14,80$. Obliczenia zostały wykonane na podstawie wyników symulacji lotu samolotu dla trzech różnych kątów przechylenia (40° , 50° i 60°), a następnie zaprezentowane na wykresie (rys. 2).



Rys. 2. Trajektorie samolotu podczas manewrów omijania przeszkody

Fig. 2. The trajectory of the aircraft during avoidance maneuvers moving obstacles

Gdy samolot i przeszkoda poruszają się po tej samej prostej, wektory ich prędkości mają ten sam kierunek ale przeciwny zwrot, to wzajemne zbliżanie się do siebie tych obiektów spowoduje ich zderzenie. W takiej sytuacji wyliczany jest czas, po którym samolot znajdzie się w strefie zakazanej, czyli w obrębie koła o promieniu r_{CMB} i środkiem w punkcie P_{PT} :

$$t_{ZG} = (r_{SP} - r_{CMB}) / (V_S + V_P) \quad (2)$$

W celu uniknięcia kolizji z ruchomą przeszkodą wybierany jest manewr omijania uwzględniający bezpieczną wartość promienia r_{CMB} zgodnie z zależnością (1). Wyliczony zostaje potrzebny czas od momentu rozpoczęcia manewru omijania do osiągnięcia punktu P_{Tmax} , w którym samolot osiąga maksymalną odległość od wcześniej realizowanego odcinka zaplanowanej trasy:

$$t_{OT} = a_t \Phi_Z + b_t \quad (3)$$

Staramy się, aby samolot znajdujący się w punkcie P_{Tmax} , miał najmniejszą odległość od przeszkody ale nie mniejszą od założonej r_{CMB} . Dla identycznych warunków obliczeniowych zastosowanych w (1) określono podobne wartości współczynników: $a_t = 0,026$ i $b_t = 5,33$ występujące w zależności (3), analogicznie jak w [2]. Wybrany z bazy manewr omijania przeszkody sprawdzany jest pod względem długotrwałości jego wykonania zgodnie z nierównością:

$$t_{ZG} \geq t_{OT} \quad (4)$$

Istotnym problemem z uwagi na bezpieczeństwo ruchu samolotu jest dobór czasu t_{rMO} (od momentu wykrycia przeszkody), po którym należy rozpocząć manewr omijania ruchomej przeszkody. Wyliczany jest on dla znanej odległości r_{SP} między

samolotem i przeszkodą, a także dla prędkości samolotu V_S i przeszkody V_P na podstawie zależności:

$$t_{rMO} = r_{SP} / (V_S + V_P) - t_{OT} \quad (5)$$

Innym szczególnym przypadkiem jest przecinanie się trajektorii samolotu i przeszkody pod kątem prostym. Współrzędne punktu przecięcia $P_{PT}(x_{PT}, y_{PT})$ można wyliczyć z zależności:

$$x_{PT} = (b_P - b_S) / (\Psi_{VS} - \Psi_{VP}) \quad (6)$$

$$y_{PT} = \Psi_{VS}(b_P - b_S) / (\Psi_{VS} - \Psi_{VP}) + b_S \quad (7)$$

gdzie współczynniki b_S i b_P wynoszą:

$$b_S = y_{OS} - \Psi_{VS} x_{OS} \quad (8)$$

$$b_P = y_{OP} - \Psi_{VP} x_{OP} \quad (9)$$

Warunek zagrożenia kolizją w rozważanym scenariuszu można sprowadzić do sprawdzenia, czy wystąpiły dwa fakty: 1) punkt położenia samolotu (x_{OS}, y_{OS}) znajdzie się w otoczeniu punktu P_{PT} w czasie z przedziału (t_{S1}, t_{S2}) oraz 2) położenie przeszkody (x_{OP}, y_{OP}) będzie w tym samym otoczeniu w przedziale czasu (t_{P1}, t_{P2}) . Wspomniane otoczenie ma promień r_{CMB} , odległość samolotu od P_{PT} wynosi d_{SZ} , a od przeszkody d_{PZ} . Granice wymienionych przedziałów można obliczyć z następujących zależności:

$$t_{S1} = (d_{SZ} - r_{CMB}) / V_S \quad (10)$$

$$t_{S2} = (d_{SZ} + r_{CMB}) / V_S \quad (11)$$

$$d_{SZ} = \sqrt{(x_{PT} - x_{OS})^2 + (y_{PT} - y_{OS})^2} \quad (12)$$

$$t_{P1} = (d_{PZ} - r_{CMB}) / V_P \quad (13)$$

$$t_{P2} = (d_{PZ} + r_{CMB}) / V_P \quad (14)$$

$$d_{PZ} = \sqrt{(x_{PT} - x_{OP})^2 + (y_{PT} - y_{OP})^2} \quad (15)$$

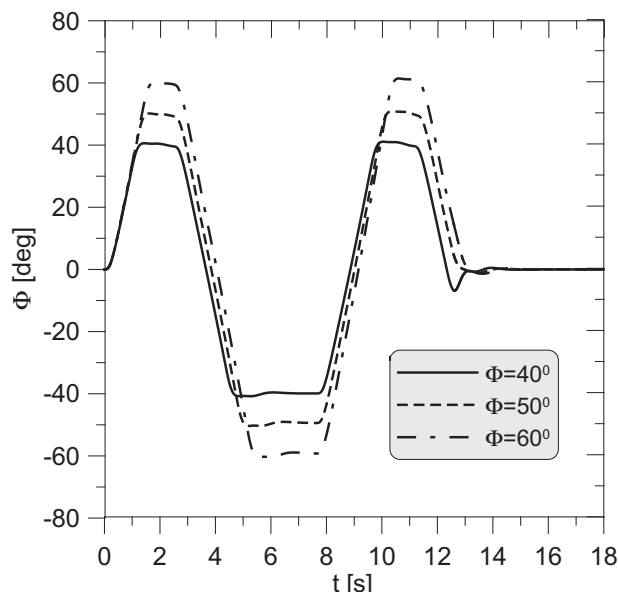
Podobnie jak dla poprzedniego scenariusza staramy się, aby samolot osiągnął maksymalną odległość gdy przeszkoda znajdzie się w punkcie P_{PT} . Warunek zagrożenia kolizją w rozważanym scenariuszu ruchu samolotu i przeszkody opisują następujące nierówności:

$$t_{S1} \geq t_{P1} \quad \wedge \quad t_{S1} \leq t_{P2} \quad \vee \quad t_{S2} \geq t_{P1} \quad \wedge \quad t_{S2} \leq t_{P2} \quad (16)$$

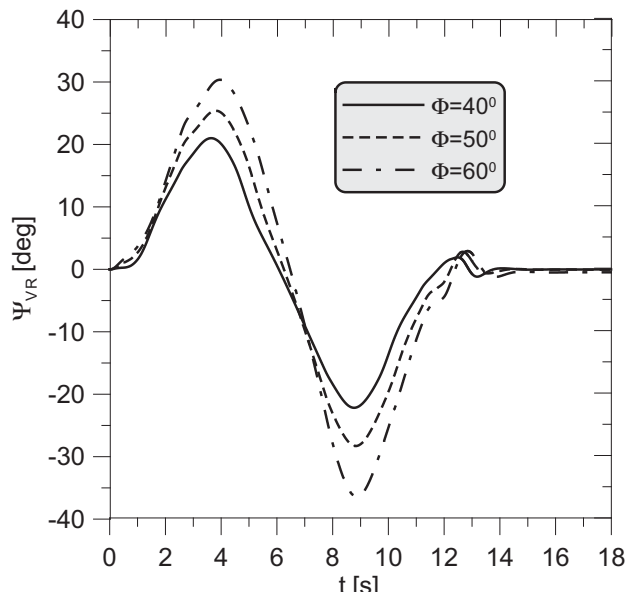
W rozważanym przypadku czas (od momentu wykrycia przeszkody), po którym należy rozpocząć manewr omijania ruchomej przeszkody wyliczany jest na podstawie zależności:

$$t_{rMO} = d_{SZ} / V_S - t_{OT} \quad (17)$$

Kolejne scenariusze dotyczą przecinania się trajektorii obiektów pod kątem mniejszym niż 90° , i większym co do wartości bezwzględnej od zera. Omawiana sytuacja stwarza trudności na etapie wykrycia przeszkody (szczególnie przy kątach bliskich zera) z powodu ograniczonego kąta widzenia przez urządzenia detekcyjne. Spotykane wielkości tego kąta to między innymi 156° [7]. Współrzędne punktu P_{PT} przecięcia się trajektorii określają zależności (6) i (7). Warunek zagrożenia kolizją ma formę zgodną z (16). Występujące w (16) wartości granic opisują następujące wzory:



Rys. 3. Kąt przechylenia samolotu w czasie manewrów omijania
Fig. 3. Roll angle of the aircraft during the avoidance manoeuvres



Rys. 4. Kąt wektora prędkości samolotu w płaszczyźnie horyzontalnej w czasie manewrów omijania
Fig. 4. Angle of velocity vector in horizontal plane during the passing manoeuvre

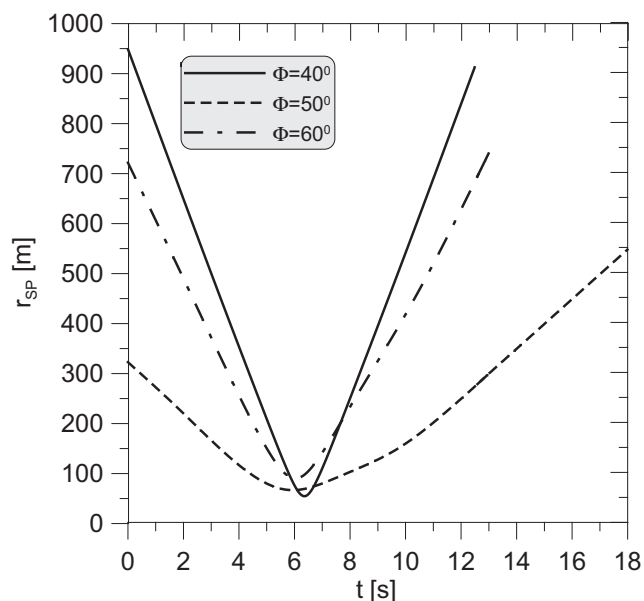
$$t_{S1} = (d_{SZ} - (r_{CMB} / \operatorname{tg}|\Psi_{VS} - \Psi_{VP}|)) / V_S \quad (18)$$

$$t_{S2} = (d_{SZ} + (r_{CMB} / \operatorname{tg}|\Psi_{VS} - \Psi_{VP}|)) / V_S \quad (19)$$

$$t_{P1} = (d_{SZ} - (r_{CMB} / \cos|\Psi_{VS} - \Psi_{VP}|)) / V_P \quad (20)$$

$$t_{P2} = (d_{SZ} + (r_{CMB} / \cos|\Psi_{VS} - \Psi_{VP}|)) / V_P \quad (21)$$

Dla kątów przecięcia się trajektorii większych niż 90° i mniejszych niż 180° zależności od (18) do (21) zostają bez zmian, a w (16) ulegają zamianie t_{P1} na t_{P2} i t_{P2} na t_{P1} . Dla dwóch ostatnich scenariuszy moment (liczony od wykrycia przeszkody), w którym należy rozpocząć manewr omijania ruchomej przeszkody wyliczany jest z zależności (17).



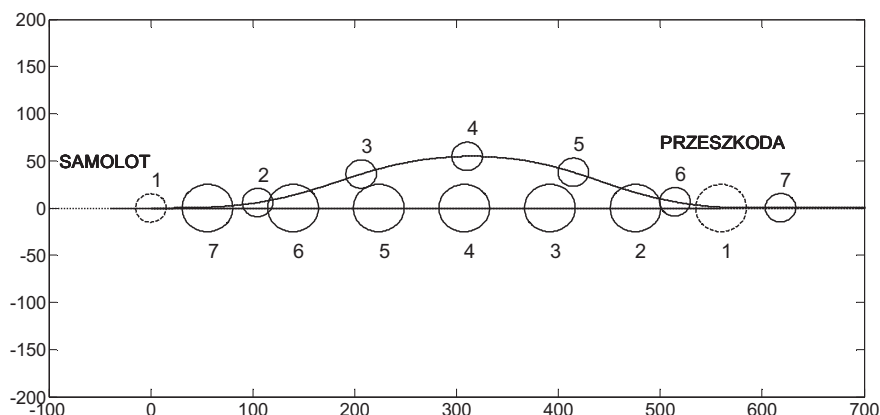
Rys. 5. Odległość samolotu od przeszkody w czasie manewrów omijania
Fig. 5. Aircraft-to-obstacle distance during the passing manoeuvre

5. Wyniki symulacji wybranych manewrów omijania

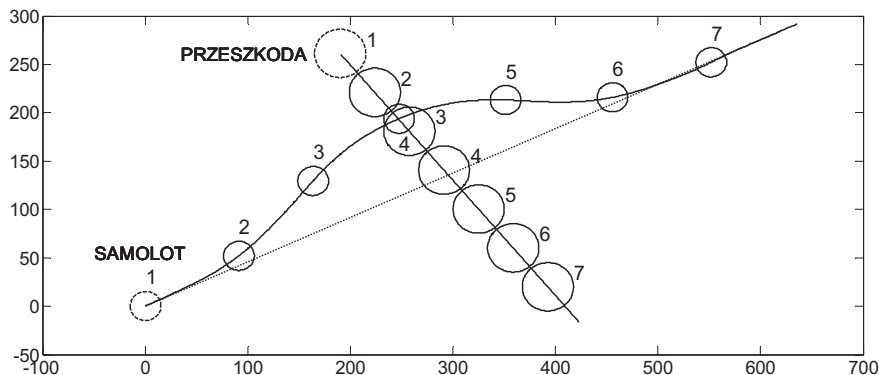
Do symulacji zastosowano model matematyczny dynamiki samolotu typu I23 Manager zgodnie z [3, 6].

Układ równań różniczkowych opisujących ruch samolotu rozwiązywany był za pomocą oprogramowania MATLAB, z użyciem procedury rk4, z krokiem 0,01 s. W trakcie symulacji ruchu samolotu wykonującego złożony manewr omijania ruchomej przeszkody uzyskano cały szereg zmiennych opisujących ten ruch. Do obliczeń przyjęto wcześniej wymienione założenia i wartości istotnych zmiennych zgodnie z tab. 1.

Do rozważań przyjęto trzy scenariusze ruchu samolotu i przeszkody. Każdy



Rys. 6. Trajektoria samolotu i przeszkody – scenariusz 1
Fig. 6. Trajectory of aircraft and obstacle – scenario 1



Rys. 7. Trajektoria samolotu i przeszkody – scenariusz 2
Fig. 7. Trajectory of aircraft and obstacle – scenario 2

Tabela 1. Parametry symulowanych scenariuszy
Table 1. Parameters of the simulated scenarios

Lp.	Φ_{sz} [°]	V_s [m/s]	Ψ_{vs} [°]	V_p [m/s]	Ψ_{vp} [°]	Ψ_{vp} [°]	r_{sp} [m]
1.	40	50	0	40	180	180	559,6
2.	50	50	40	25	300	65	322,8
3.	60	50	0	72	140	140	721,8

z tych scenariuszy charakteryzuje się innymi parametrami manewru omijania, różnymi prędkościami przeszkody i kątami przecięcia trajektorii. W dalszej części pracy zostaną przedstawione przebiegi położenia kątownego samolotu i wybranych trajektorii samolotu oraz przeszkody.

Do ominięcia ruchomej przeszkody i powrotu na wcześniej realizowany odcinek trajektorii niezbędne było wykonanie trzech zakrętów powodujących zmianę kąta wektora prędkości samolotu (rys. 4). Pierwszy i trzeci w lewo, a drugi w prawo. Każdemu z nich towarzyszyło to samo zadane przechylenie (rys. 3) o wielkości zależnej od rozpatrywanego scenariusza, zgodnie z tabelą 1.

Pierwszy zakręt zapewnił uniknięcie kolizji, drugi pozwolił na bezpieczne ominięcie przeszkody a trzeci zapewnił powrót do lotu wzdłuż wybranego odcinka trajektorii realizowanego przed rozpoczęciem manewru. Uzyskane w trakcie symulacji przebiegi kąta przechylenia (z wymienionymi fazami) dla rozpatrywanych scenariuszy pokazano na rys. 3.

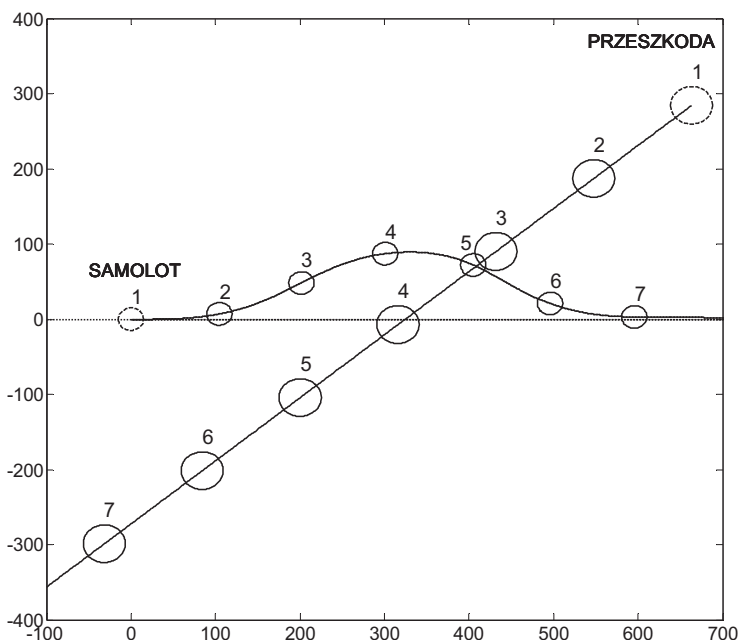
Opisanemu ruchowi samolotu towarzyszą pokazane zmiany kąta wektora prędkości samolotu przedstawione na rys. 4. W całym uzyskanym zakresie zmian kąta Ψ_{vs} można wyodrębnić, jak dla kąta przechylenia, podobne obszary: pierwszy odpowiedzialny za uniknięcie kolizji, następny służący ominięciu przeszkody, i ostatni zapewniający powrót do lotu z wcześniej przyjętym kierunkiem poruszania się.

Sposób rozwiązania konfliktu ruchu samolotu i przeszkody dla rozpatrywanych scenariuszy ilustrują przebiegi trajektorii obu obiektów (rys. 6, 7, 8). Kolejne położenia samolotu i przeszkody zaznaczono na trajektorii w odstępach co 2 s i ponumerowano od 1 do 7. Mniejsze okręgi reprezentują samolot, a większe okręgi symbolizują przeszkodę. Początkowe położenie obu tych obiektów zostało wyróżnione okręgiem narysowanymi linią przerywaną. Dla rozważanych sytuacji zmiany odległości przeszkody od samolotu miały odmienny przebieg (rys. 5). Różne są kąty nachylenia linii przedstawiającej ten parametr oraz kształt krzywej w otoczeniu wartości minimalnej.

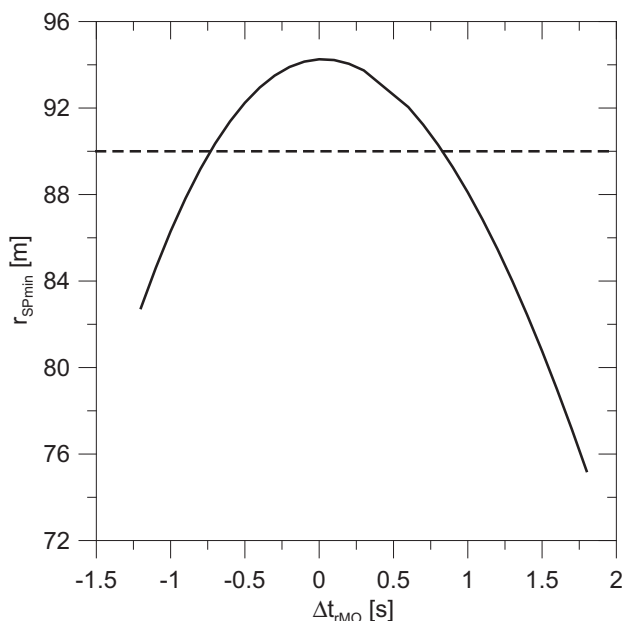
Na rys. 9 przedstawiono wykres zmian minimalnej odległości samolotu od przeszkody r_{SPmin} w funkcji błęd wymaganego

czasu rozpoczęcia manewru omijania t_{rMO} (5) na przykładzie trzeciego scenariusza. Linią przerywaną oznaczono przyjętą dopuszczalną wartość minimalnej odległości t_{rMO} dla rozważanego scenariusza.

Dopuszczalny zakres wartości r_{SPmin} uzyskany podczas zaproponowanego manewru wynosi od 90 m do 94,3 m i występuje na odcinku czasu o długości 1,5 s. W tym przedziale wrażliwość odległości r_{SPmin} na zmiany czasu t_{rMO} wynosi poniżej 2,9 m/s.



Rys. 8. Trajektoria samolotu i przeszkody – scenariusz 3
Fig. 8. Trajectory of aircraft and obstacle – scenario 3



Rys. 9. Minimalna odległość samolotu od przeszkody w funkcji błęd czasu rozpoczęcia manewru omijania – scenariusz 3
Fig. 9. Minimal aircraft-to-obstacle distance treated as functions of the time error of the passing manoeuvre starting – scenario 3

6. Wnioski

W pracy przedstawiono wybrane scenariusze zagrożenia kolizją z ruchomą przeszkodą oraz odpowiednie manewry stanowiące reakcję na te zagrożenia. Zawarta w pracy metoda rozwiązania opisanego problemu dotyczy szerszego zakresu scenariuszy ruchu obiektów. W trakcie zasymulowanych lotów wykonane zostały manewry antykolizyjne o odmiennych parametrach ruchu samolotu. Uzyskane wyniki z tej symulacji pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- Zaproponowane manewry ominięcia przeszkody pozwoliły bezpiecznie doprowadzić samolot do strefy niezagrażonej kolizją, a następnie do lotu wzdłuż ostatnio realizowanego odcinka zaplanowanej trasy.
- W trakcie realizacji zasymulowanych manewrów osiągnięto krótki czas wyeliminowania zagrożenia kolizji i szybki powrót do lotu wzdłuż żądanej trasy.
- Między rozpatrywanymi scenariuszami wystąpiły znaczne różnice minimalnych odległości samolotu od przeszkody, dla których konieczne było rozpoczęcie zaproponowanego manewru antykolizyjnego.
- Uzyskano niski poziom wrażliwości marginesu bezpieczeństwa manewru omijania na zmiany czasu jego rozpoczęcia.
- Oszacowanie zadanego zasięgu detektora przeszkód wymaga uwzględnienia nie tylko wymienionych w pracy parametrów związanych z dynamiką samolotu, ale również czasu realizacji przedstawionego algorytmu na wybranej platformie obliczeniowej oraz wpływu różnego rodzaju zakłóceń.

Bibliografia

1. Ariyur K.B., Lommel P., Enns D.F., *Reactive in flight obstacle avoidance via radar feedback*, Portland 2005, 2978–2982.
2. Benayas J.A., Fernández J.L., Sanz R. Diéguez, A.R., *The beam-curvature method: a new approach for improving local realtime obstacle avoidance*, "The International Federation of Automatic Control", 2002.
3. Blajer W., Graffstein J., *Manewr antykolizyjny wykorzystujący teorię ruchu programowego*, „Mechanika w lotnictwie”, 2012, 597–613.
4. Graffstein J., *Wpływ charakterystyk obiektu i przebiegu jego ruchu na parametry układu stabilizacji lotu*. „Mechanika w lotnictwie”, 2008, 109–126.
5. Graffstein J., *Wpływ wybranych zmiennych stanu na dokładność toru lotu samolotu podczas automatycznie wykonywanego manewru*. „Prace Instytutu Lotnictwa”, 202/2009, 51–64.
6. Graffstein J., *Elementy procesu wykrycia zagrożenia kolizją i automatycznie sterowany manewr awaryjny*. „Pomiary Automatyka Robotyka”, 2/2012, 383–387.
7. Graffstein J., *Anti-collision system with radar obstacle detector*. „Pomiary Automatyka Robotyka”, 2/2013, 171–175.
8. Lalish E., Morgansen K.A., Tsukamaki T., *Decentralized Reactive Collision Avoidance for Multiple Unicycle-Type-Vehicles*, "American Control Conference", 2009, 5055–5061.
9. Shim D.H., Sastry S., *An evasive maneuvering algorithm for UAVs in see-and avoid situations*, "American Control Conference", 2007, 3886–3891.

Manoeuvres Performed by the Aircraft During Avoidance of a Moving Obstacle for the Selected Scenarios

Abstract: The article presents the relations describing variables between an aircraft and a moving obstacle. Conditions determining the threat of possible collision were formulated. The second important task for determining these variables was to create prerequisites for selection of anti collision manoeuvre and position of the aircraft where the manoeuvre is to be started. Various scenarios of the motion of the aircraft and obstacle as well as their relative positions were analysed. The structure of the process of searching for the parameters of the appropriate anti collision manoeuvre was proposed. Discussion is illustrated by the examples of computer simulations of flight of the aircraft when passing by a moving obstacles.

Keywords: collision avoidance, conflict scenario, obstacle avoidance procedure, numerical simulation of flight dynamic

dr inż. Jerzy Graffstein

jgraff@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.

