

Tomasz Rogalski, Jacek Prusik

# Sterowanie trajektorią podczas lotu akrobacyjnego

JEL: R41 DOI: 10.24136/atest.2019.249  
 Data zgłoszenia: 28.01.2020 Data akceptacji: 10.02.2020

W artykule omówiony został problem automatycznego sterowania samolotem podczas wybranych figur akrobacji lotniczej. Dokładny proces syntezy systemów sterowania został omówiony w pozycjach [13, 20, 21]. Charakter manewrów oraz zakres zmian parametrów lotu podczas ich wykonywania ograniczają możliwość zastosowania klasycznych układów autopilota, jak również możliwość uzyskania dokładnej informacji na temat dokładnego położenia przestrzennego samolotu. Przedstawiono alternatywne podejście do projektowania układów automatycznego sterowania samolotem, które może zostać zastosowane w omówionych przypadkach. Zaprezentowano badane manewry z punktu widzenia mechaniki lotu, strukturę algorytmów sterowania oraz metodę weryfikacji ich działania w testach symulacyjnych.

**Słowa kluczowe:** autopilot, akrobacja lotnicza, korkociąg, Immelmann, symulacja, Matlab, X-Plane.

## Wstęp

Obecnie systemy automatycznego sterowania lotem są standardowym rozwiązaniem w samolotach cywilnych i wojskowych. Od lat stosowane są w załogowych statkach powietrznych w celu stabilizowania takich parametrów lotu, jak kurs, wysokość i trajektoria lotu. Obecnie istnieje coraz popularniejsza koncepcja wykorzystania systemów sterowania w nietypowych manewrach, np. podczas lotu akrobacyjnego. To rozwiązanie jest coraz popularniejsze w zastosowaniu dla bezzałogowych statków powietrznych (UAV). Pomysł wykonywania manewrów akrobacyjnych został już wykorzystany w innej pracy [13, 17, 22]. W tym artykule przedstawiono podejście do problemu sterowania trajektorią samolotu w nietypowych stanach lotu. w celu przedstawienia wydajności zastosowanych algorytmów i precyzji sterowania trajektorią lotu wybrano manewry korkociągu i Immelmanna.

Artykuł odnosi się do wyników wcześniejszych badań autorów, które skupiają się nad systemami automatycznego sterowania lotem wykonującymi wybrane elementy lotu akrobacyjnego [12, 20, 21]



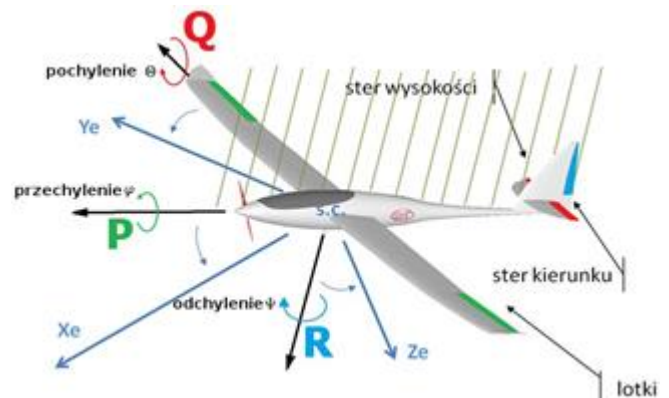
Rys. 1. Ewolucja układów autopilota.

## 1. Założenia

### 1.1. Samolot – obiekt sterowania

Obiektem sterowania jest samolot w układzie klasycznym. Sterowanie jego orientacją przestrzenną odbywa się przez wychylenie płaszczyzn sterowych generujących momenty sił wokół osi XYZ,

układu współrzędnych związanego z samolotem. Jego początek znajduje się w środku ciężkości samolotu a osie są skierowane odpowiednio w kierunku przodu - oś X, prawego skrzydła - oś Y i w dół - oś Z (Rys.2). Do określenia orientacji przestrzennej samolotu względem powierzchni ziemi wykorzystuje się i kąty Eulera opisujące wzajemną orientację układu związanego z samolotem i układu -  $Ox_e Y_e Z_e$  (Rys.2). Jego początek również znajduje się w środku ciężkości samolotu jednak jego osie  $X_e$  i  $Y_e$  są równoległe do powierzchni ziemi [2, 13].



**równania ruchu samolotu** 
$$\begin{cases} \bar{F} = m\bar{a} \\ \bar{M} = \varepsilon I \end{cases}$$

- F - wypadkowa siła działająca na samolot
- a - przyspieszenie środka masy
- M - moment działający na samolot
- $\varepsilon$  - przyspieszenie kątowe
- m - masa samolotu
- I - moment bezwładności samolotu

- P - prędkość kątowa wokół osi OX
- Q - prędkość kątowa wokół osi OY
- R - prędkość kątowa wokół osi OZ

Rys. 2. Sterowanie orientacją przestrzenną samolotu.

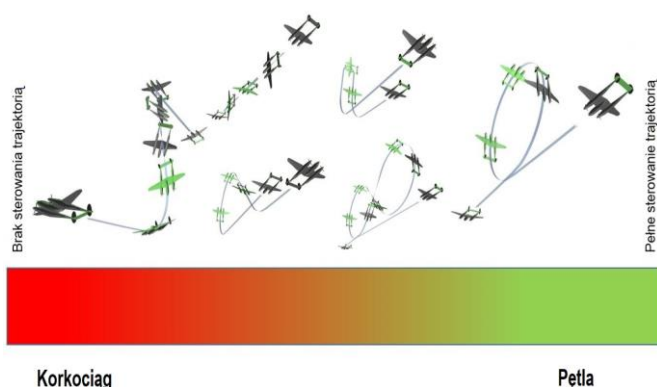
Dynamikę samolotu określa następujący zestaw zmiennych: u – prędkość,  $\alpha$  – kąt natarcia,  $\theta$  – kąt pochylenia,  $\beta$  – kąt ślizgu,  $\varphi$  – kąt przechylenia,  $\psi$  – kąt odchylenia, które przy pomocy dodatkowych zmiennych:  $\omega_x$  – składowa podłużna wiatru,  $\omega_y$  – składowa boczna wiatru,  $\omega_z$  – składowa pionowa wiatru, T – ciąg, D – opór, L – siła nośna, pozwalają na zdefiniowanie  $\gamma$  – kąta toru lotu w następującej formie:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ h \\ \psi \\ \varphi \\ \gamma \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \cos(\psi) \cos(\gamma) + \omega_x \\ V \sin(\psi) \cos(\gamma) + \omega_y \\ V \sin(\gamma) + \omega_z \\ \frac{g}{W} [(T \cos(\theta - \gamma) - D) - W \sin(\gamma)] \\ \frac{g \sin(\varphi)}{WV} [L + T \sin(\alpha)] \\ \frac{g}{WV} [(L + T \sin(\theta - \gamma)) \cos(\varphi) - W \cos(\gamma)] \\ -cT \end{bmatrix} \quad (1)$$

Gdzie  $X$ ,  $Y$  – translokacja podłużna i boczna,  $W$ ,  $V$  – prędkości wzdłuż osi  $Z$  i  $Y$  układu współrzędnych związanej z ziemią,  $h$  – zmiana wysokości [10, 14, 22]. Możliwe jest podzielenie dynamiki samolotu na tzw. ruch podłużny i ruch boczny.

## 1.2. Automatyczny lot akrobacyjny

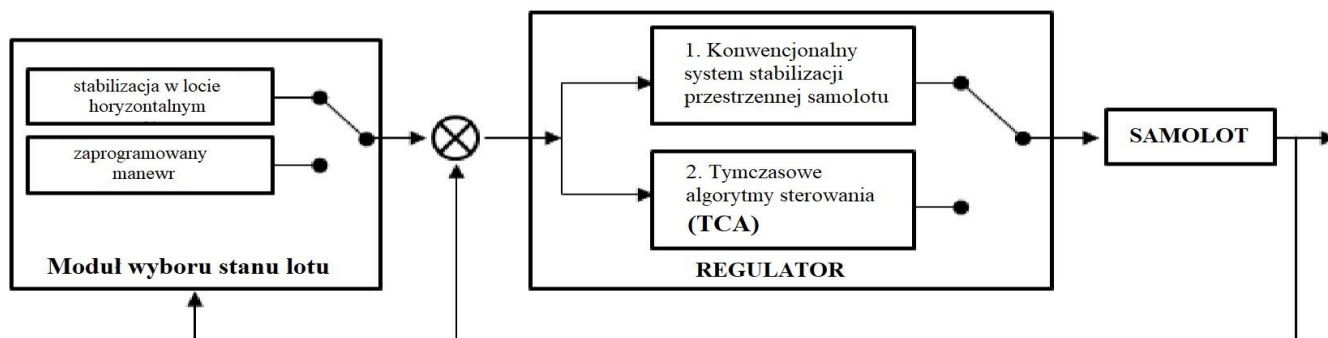
Systemy sterowania lotem nadal pozostają przedmiotem badań koncentrujących się na wysoce wyspecjalizowanych i nietypowych funkcjach, takich jak automatyczne sterowanie lotem statku powietrznego po trajektorii, zapobieganie niebezpiecznym stanom lotu, manewry wyprowadzające, a także celowe wykonywanie figur akrobacji lotniczej. Podczas projektowania zwrócono większą uwagę na skuteczność niż na precyzję trajektorii wykonywanego manewru. Znajduje to odzwierciedlenie w strukturze algorytmów sterowania, których celem jest imitacja sterowania przez pilota, w przeciwieństwie do niektórych podejść analitycznych. W pracy przedstawiono najnowsze podejście do algorytmów automatycznego sterowania samolotami zdolnych do utrzymywania trajektorii lotu w różnych manewrach akrobacyjnych z pewnym założonym poziomem dokładności.



Rys. 3. Precyzja sterowania trajektorią w zależności od wykonywanego manewru.

Prawa sterowania stosowane w systemie automatycznego sterowania lotem biorą się z wiedzy eksperckiej i mogą być wykorzystywane do wykonywania manewrów akrobacyjnych charakteryzujących się różnym poziomem dokładności sterowania trajektorią i opierają się na następujących założeniach [20, 21, 22, 24].

- Manewr akrobacyjny składa się zasadniczo z trzech faz. Pierwszy to wstępny etap przygotowawczy charakteryzujący się utrzymaniem stałych parametrów lotu. Drugi to zadany manewr akrobacyjny. Trzeci to ponownie stabilizacja lotu horyzontalnego.
- Przez kilka chwil piloci nie mają dokładnych informacji o parametrach lotu samolotu. Zamiast tego dokonują jedynie oceny przybliżonej.



Rys. 4. Schemat algorytmu sterowania zaimplementowanego do autopilota wykonującego manewr akrobacyjny.

- Wzorce sterowania przez pilota, wpływające na trajektorię lotu, w dużej mierze zależą od doświadczenia pilota i umiejętności zdobytych podczas szkolenia prawidłowych reakcji.

Reguły te pozwoliły zaprojektować model autopilota wykonującego figury akrobacji lotniczej, przedstawionego na rysunku 4 [20, 21, 22].

Zasadniczo przetestowane wcześniej autopiloty wykonywały zaprogramowany manewr w dowolnym momencie podczas lotu. Zasadę ich działania pokazano na rysunku 4, przełączając regulator ze stabilizacji przestrzennej na tymczasowe algorytmy sterowania (TCA). Układ sterowania można zaprogramować do wykonywania jednego lub kilku manewrów. Sterowanie trajektorią lotu może być wykonywane w pętli zamkniętej lub otwartej, w zależności nie tylko od wykonanej figury, ale także od fazy tej figury.

## 2. Rozważane manewry lotnicze

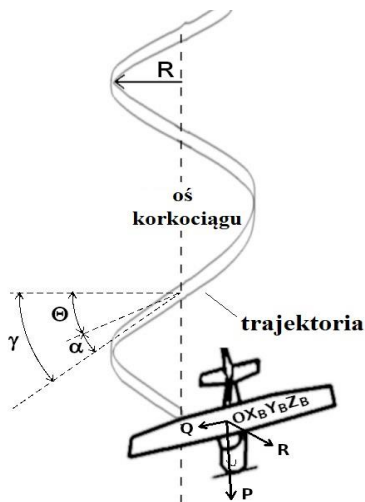
### 2.1. Korkociąg

Korkociąg, to stan lotu powstały w wyniku zaburzenia w ruchu bocznym na przeciągnięty samolot. Zaburzenie to można wywołać celowo, poprzez odpowiednie działania sterem kierunku lub nieumyślnie, jeśli samolot przypadkowo osiągnie dostatecznie duży kąt odchylenia w przeciągnięciu. W korkociągu skrzydło wewnętrzne jest zawsze przeciągnięte, podczas gdy skrzydło zewnętrzne nadal może wytwarzać siłę nośną powodując, że samolot obraca się w kierunku przeciągniętego skrzydła. Oba skrzydła znajdują się pod różnymi i bardzo dużymi kątami natarcia, a samolot obraca się wokół wszystkich osi układu współrzędnych (rysunek 2) z całkowitą prędkością obrotu  $\Omega$  obliczoną z (2), jednocześnie gwałtownie tracąc wysokość wzdłuż trajektorii zorientowanej na płaszczyznę horyzontu pod kątem toru lotu  $\gamma$  (rysunek 5).

$$\Omega = \sqrt{(P^2 + Q^2 + R^2)} \quad (2)$$

Gdzie:  $P$ ,  $Q$ ,  $R$  oznaczają prędkości kątowe odpowiednio wokół osi  $X_B Y_B Z_B$  układu współrzędnych (rysunek 5).

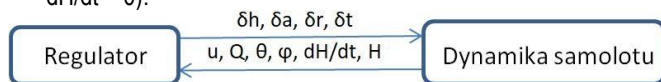
Zasadniczo cały manewr składa się z głównych faz: faza przed korkociągiem, prowadząca do statycznego przeciągnięcia, korkociąg zasadniczy i wyprowadzenie do lotu horyzontalnego. Jednak zarówno w fazie przed, jak i w trakcie korkociągu, precyzyjne sterowanie trajektorią lotu nie jest głównym celem badań. W rzeczywistości wynika ona głównie z charakterystyki samolotu, a nie z zastosowanych praw sterowania. Trajektorja fazy po korkociągu jest pośrednio efektem zastosowanego sterowania wyprowadzającego samolot z korkociągu i możliwa jest jej kontrola w pewnym ograniczonym zakresie.



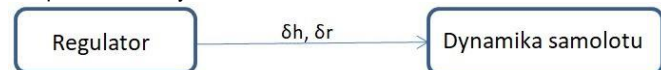
Rys. 5. Przebieg korkociągu.

Zatem z punktu widzenia sterowania cały korkociąg można podzielić na sekwencje. W rezultacie uzyskano następujący algorytm:

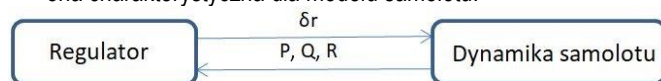
1. Zwalnianie na stałej wysokości, aż do osiągnięcia prędkości przeciągnięcia. Podczas tej fazy system redukuje przepustnicę do minimum, utrzymując stałą wysokość i trajektorię, a skrzydła są utrzymane w poziomie. Samolot leci wzdłuż trajektorii, która ma być linią prostą, jednak jej przebieg ma niższy priorytet niż utrzymanie stałej wysokości ( $H = \text{const}$ , szybkość opadania  $dH/dt = 0$ ).



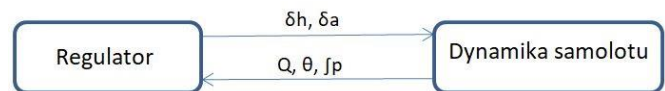
2. Wprowadzenie i wykonanie korkociągu poprzez pełne wychylenie sterów wysokości i kierunku bez wprowadzania parametrów lotu do regulatora (TCA). Sterowanie odbywa się w pętli otwartej, a trajektoria w ogóle nie jest kontrolowana. Wynika ona bezpośrednio z dynamiki samolotu.



3. Zatrzymanie autorotacji do momentu uznania całkowitej prędkości obrotu za wystarczająco małą [21]. Podczas tej fazy stery wysokości i kierunku są ustawiane w ustalonym położeniu neutralnym. Trajektoria pozostaje niekontrolowana i nie jest przedmiotem żadnego działania systemu sterowania. Pozostaje ona charakterystyczna dla modelu samolotu.



4. Wyprowadzanie z nurkowania (strome na początku i płaskie później) do lotu poziomego z prędkością kątową pochylania, kątem pochylenia i całą prędkością kątową przechylenia jako danymi wejściowymi, podczas gdy system ma zaprogramowaną stałą wartość prędkości pochylania. Zamiast wejścia kąta przechylenia używana jest cała prędkość kątowa przechylenia, ponieważ istnieje prawdopodobieństwo, że regulator może obliczyć nieprawidłowy sygnał sterujący lotkami, aby utrzymać skrzydła w poziomie. Trajektoria powinna być fragmentem łuku w płaszczyźnie pionowej. W idealnym przypadku jest to ćwiartka koła. Wynika to z dynamiki samolotu i pożądanej prędkości kątowej pochylania. W ruchu bocznym samolotu oczekuje się, że będzie to krzywa dokładnie w płaszczyźnie ruchu bez żadnych odchyień. Efekt ten ma zostać osiągnięty poprzez odpowiednie sterowanie lotkami i sterem kierunku.



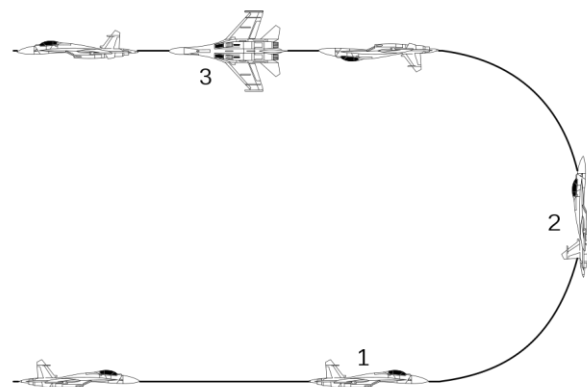
Opierając się na wiedzy i doświadczeniu, istnieje duże prawdopodobieństwo, że przeciągnięty samolot zostanie wprowadzony w korkociąg przez pełne wychylenie sterów wysokości i kierunku. Ważne jest, że podczas korkociągu regulator nie otrzymuje na wejściu kątów orientacji przestrzennej samolotu. Można zatem stwierdzić, że podczas tej fazy sterowanie odbywa się w pętli otwartej i bez precyzyjnego sterowania trajektorią, ale jest to jedna z najbardziej wydajnych metod wykonania tego manewru w sposób automatyczny.

W następnym kroku regulator zostaje ponownie przełączony na konwencjonalną stabilizację przestrzenną. Podczas przeciągania w pierwszej fazie i powrotu do lotu horizontalnego po nurkowaniu w ostatniej fazie, samolot jest kontrolowany przez połączone systemy autopilota utrzymujące wysokość i skrzydła w poziomie, a prawo sterowania przy zatrzymywaniu autorotacji jest podobne do tego, które stosuje się w tłumikach holendrowania.

## 2.2. Immelmann

Zwrot Immelmanna jest manewrem akrobacyjnym, którego efektem jest wyrównany lot w przeciwnym kierunku na większej wysokości. Podstawowa zasada jego wykonania jest wyrażona w trzech krokach:

1. Lot poziomy.
2. Pół pętli (pochylenie o 180 stopni do góry).
3. Pół becзки (przechylenie o 180 stopni w celu przywrócenia lotu horizontalnego).



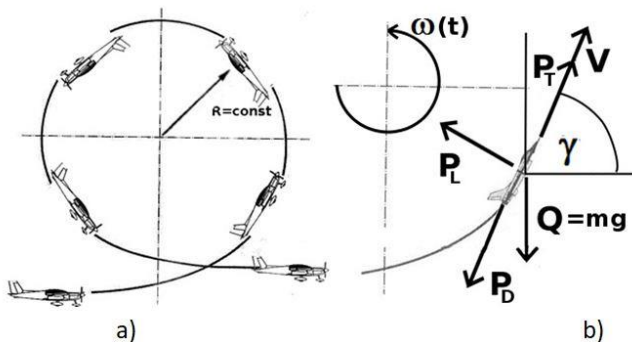
Rys. 6. Przebieg manewru Immelmanna.

Aby pomyślnie wykonać Immelmanna, pilot przyspiesza do wystarczającej prędkości, aby wykonać pętlę. Następnie przechodzi do wznoszenia i kontynuuje ściąganie drążka, bądź wolantu na siebie w miarę wznoszenia się samolotu. Lotkami wykonuje się korekty przechylenia, aby utrzymać pół-pętlę w osi lotu, patrząc z ziemi. Gdy samolot przelatuje nad punktem, w którym rozpoczęto wznoszenie, należy wykonać obrót względem osi podłużnej w celu przywrócenia lotu poziomego. W rezultacie samolot znajduje się na większej wysokości, a jego kurs zmienił się o 180 stopni.

Z punktu widzenia sterowania trajektorią lotu środek ciężkości statku powietrznego ma poruszać się w płaszczyźnie pionowej równoległej do początkowego kierunku lotu wzdłuż krzywej przedstawionej na rys. 6, w idealnym przypadku. Taki efekt powinien zostać osiągnięty poprzez właściwe użycie lotek steru wysokości i steru kierunku. Jednak w warunkach rzeczywistych dopuszczalne są pewne odchylenia od idealnej trajektorii lotu. To, jakie odchylenie

jest nadal uznawane za dopuszczalne, opiera się na ocenie ekspertów. Te cechy trajektorii lotu i oceny odchyień są kluczowym czynnikiem w podejściu do algorytmów sterowania.

Pętla jest pierwszym elementem manewru Immelmanna. Figura ta jest jedną z tak zwanych symetrycznych, tj. tych, w których ruch samolotu odbywa się w płaszczyźnie symetrii. Dodatkowo płaszczyzna jest zorientowana pionowo, a trajektoria ruchu ma być okręgiem. Uprozczone nieliniowe równania dynamiki ruchu statku powietrznego zakładają, że zachowana jest równowaga momentów podłużnych, a kierunek i zwrot wektora siły ciągu ( $P_T$ ) są zgodne z wektorem prędkości ( $V$ ) (rysunek 7).



Rys. 7. Trajektoria lotu (a) i główne siły wpływające na ruch samolotu (b) podczas pętli.

$$\frac{Q}{g} \frac{dV}{dt} = P_T - P_D - Q \sin \gamma; \quad V \frac{Q}{g} \frac{d\gamma}{dt} = P_L - Q \cos \gamma$$

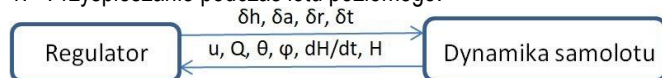
$$\omega(t) \approx \frac{d\gamma(t)}{dt} \approx \frac{d\vartheta(t)}{dt} \approx q(t)$$

(3)

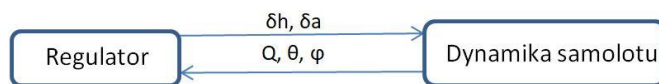
Gdzie:  $Q$  - ciężar,  $g$  - przyspieszenie ziemskie,  $V$  - prędkość,  $P_L$  - siła nośna,  $P_D$  - opór powietrza,  $P_T$  - ciąg,  $\gamma$  - kąt toru lotu,  $Q$  - prędkość kątowna pochylenia,  $\vartheta$  - kąt pochylenia rozpoznawany jako obrót wokół osi  $OY$ ,  $\omega$  - prędkość kątowna samolotu wokół centrum pętli.

Jest to pierwsza faza manewru Immelmanna, w którego skład wchodzi łącznie 3 fazy. W efekcie podział ten umożliwił opracowanie praw sterowania:

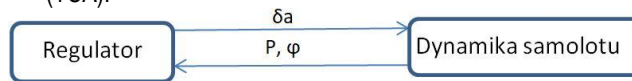
1. Przyspieszanie podczas lotu poziomego.



2. Połowa pętli wykonywana przez regulator stałej prędkości kątowej pochylenia, aż do osiągnięcia 180 stopni kąta pochylenia (TCA). Skrzydła są utrzymywane w poziomie przez sterowanie lotkami.



3. Połowa bezki wykonywana przez regulator stałej prędkości kątowej przechylenia, aż do osiągnięcia lotu horyzontalnego (TCA).



Lot horyzontalny oznacza, że ostatnia sekwencja TCA ustawiła zerową stałą wartość kąta przechylenia, który ma zostać utrzymany po wykonaniu manewru. Ze skrzydłami w poziomie i na stałej wysokości samolot jest przechwytywany przez konwencjonalnego autopilota zapewniającego stabilizację przestrzenną.

Immelmann jest więc przykładem manewru umożliwiającego ciągłą dwukierunkową wymianę danych między modelem samolotu, a układem sterowania. Wszystkie sekwencje sterowania, w tym TCA, oparte są na prawach sterowania w pętli zamkniętej. Dlatego można stwierdzić, że manewr Immelmanna może zostać wykonany z precyzyjnym sterowaniem trajektorią lotu.

### 3. Symulacja działania algorytmów i jej wybrane wyniki

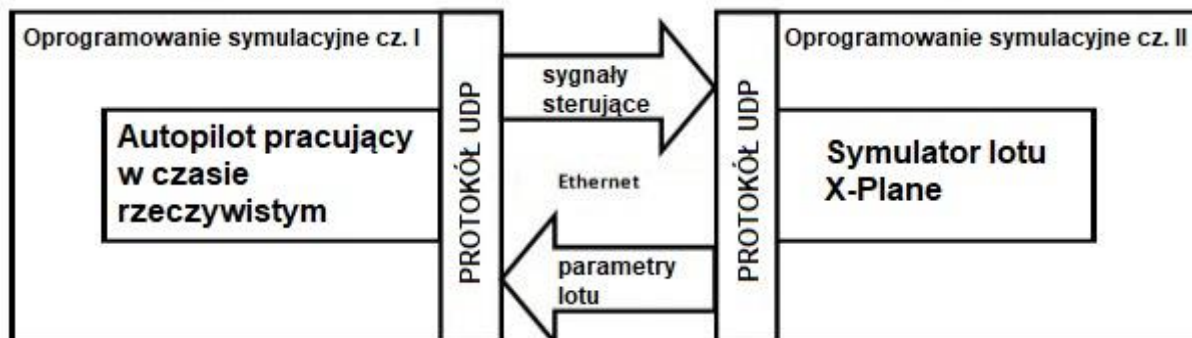
#### 3.1. Stanowisko badawcze

Symulacja działania zaprojektowanych do tej pory systemów sterowania była możliwa dzięki połączeniu środowiska Matlab-Simulink ze symulatorem lotu X-Plane za pomocą protokołu UDP [13]. Model układu sterowania zaprojektowany i zbudowany w środowisku Simulink wysyła sygnały sterujące do symulatora lotu. Jako informację zwrotną otrzymuje parametry lotu wymagane do prawidłowego funkcjonowania (rysunek 8).

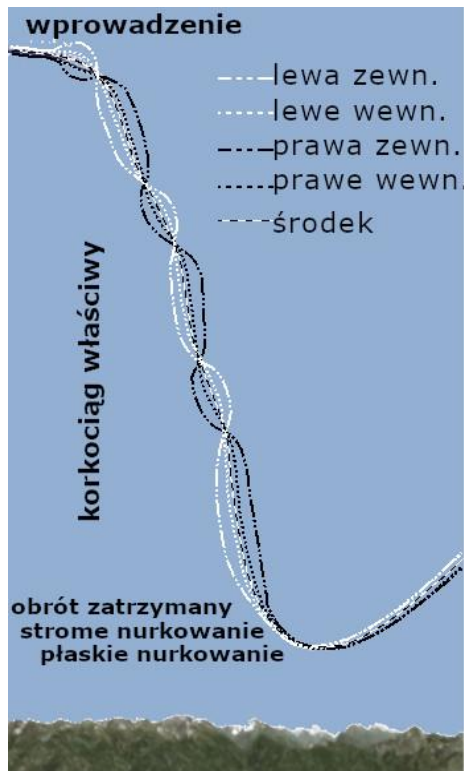
Taka konstrukcja stanowiska badawczego umożliwia testowanie opracowanych struktur autopilotów i wykonywanie symulacji działania zaprojektowanych układów sterowania samolotem, w tym wykonujących manewry akrobacyjne [20, 21].

#### 3.2. Korkociąg

Zdefiniowane algorytmy zostały zweryfikowane podczas symulacji, podczas której wykonano manewr korkociągu (rys. 9) od początku do wyprowadzenia końcowego, gdy przywrócone zostało sterowanie przez konwencjonalny układ stabilizacji przestrzennej (rys. 4). Rysunek 9 przedstawia trajektorie lotu przed, w trakcie i po wykonaniu korkociągu przy zastosowaniu algorytmu sterowania opartego na rozważaniach i założeniach podanych wcześniej w niniejszym artykule i szczegółowo przedstawionych w [21]. Korkociąg jest przypadkiem manewru kontrolowanego przez TCA, a trajektoria nie jest bezpośrednio sterowalna. Jednak algorytmy te zaprojektowano na podstawie założeń wyliczonych wcześniej w niniejszym artykule i szczegółowo opisanych w pracach [20, 21].



Rys. 8. Konfiguracja stanowiska testowego do symulacji SIL.

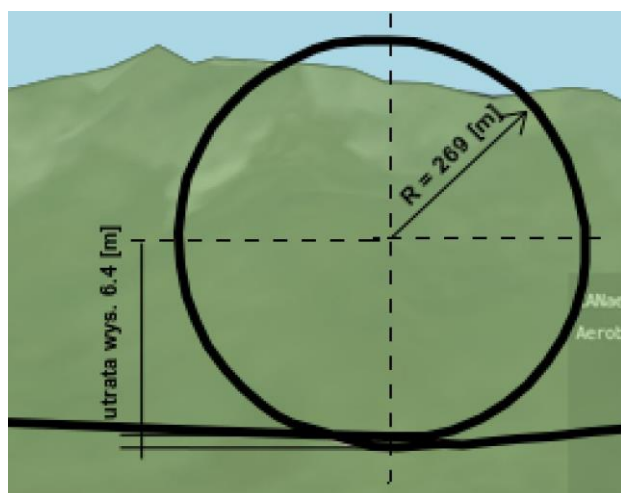


Rys. 9. Przykładowa trajektoria korkociągu podczas symulacji SIL.

### 3.3. Immelmann

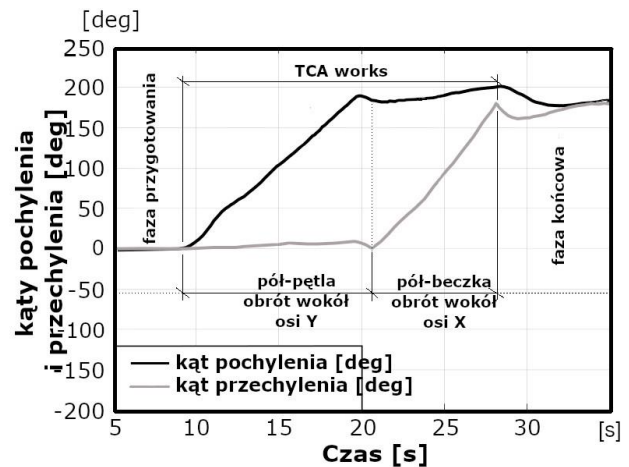
Symulacja SIL tego manewru została wykonana w taki sam sposób, jak poprzednio. W rzeczywistości Immelmann składa się z dwóch różnych i niezależnych sekwencji sterowania. Pierwsza to półpętla niezbędna do wykonania zwrotu Immelmanna. Tak więc, przed prezentacją zasadniczego manewru, najpierw przedstawione zostaną krótkie wyniki symulacji pełnej pętli. Pełne rozważanie i bardziej szczegółowe wyniki zostały zawarte w pracy [20].

Algorytm sterowania utworzony przy użyciu podejścia przedstawionego w tym artykule oraz w [20] może zapewnić sterowanie trajektorią podczas pętli zakwalifikowane przez ekspertów jako wystarczająco dobre. Przykładowe ilościowe miary jakości sterowania przedstawiono na rysunku 10 i w tabeli 1.



Rys. 10. Przykładowa trajektoria pętli podczas symulacji SIL.

Na koniec przeprowadzono symulację działania autopilota wykonującego Immelmanna. Aby przedstawić ten proces (Rys. 11), pokazano przebiegi czasowe kątów orientacji statku powietrznego - pochylenia i przechylenia.



Rys. 11. Przebiegi czasowe kątów pochylenia i przechylenia zarejestrowanych podczas symulacji SIL manewru Immelmanna.

Eksperymenty potwierdziły, że podejście do algorytmów sterowania lotem opartych na TCA jest w stanie zapewnić kontrolę nad samolotem lecącym wzdłuż trajektorii, będącej przybliżeniem niektórych założonych trajektorii podczas manewru Immelmanna.

### Podsumowanie

W artykule przedstawiono specyficzne podejście do syntezy algorytmów automatycznego sterowania przeznaczonych dla małych statków powietrznych. Są one zdolne do sterowania podczas różnych niekonwencjonalnych stanów lotu. Należy podkreślić, że w ten sposób można kontrolować trajektorię lotu. Poziom dokładności sterowania zależy od konkretnych cech wykonywanego manewru i określonych zasad sterowania, z których korzysta system. Jednak zgodnie z założeniami imitują one strategię sterowania stosowaną przez pilotów i zachowują charakterystyczne cechy trajektorii, po której leci samolot. Przykłady przedstawione w tym artykule są wystarczająco różne, aby udowodnić tę hipotezę.

Manewr Immelmanna wymaga, aby środek ciężkości samolotu poruszał się w płaszczyźnie pionowej wzdłuż gładkiej trajektorii z jednoznacznie określonymi kątami orientacji przestrzennej samolotu w funkcji czasu. Zatem, wymusza to znacznie większą dokładność, niż zasadnicza faza korkociągu, podczas której nie ma aktywnego sterowania, a trajektoria wynika głównie z charakterystyki statku powietrznego. Nie ma to jednak większego wpływu na efektywność pracy układu sterowania.

Analizując kwestię współczesnych osiągnięć w tej dziedzinie można wnioskować, że wykonywanie akrobacji przez autonomiczne bezałogowe statki powietrzne (UAV) staje się coraz bardziej popularnym tematem w społeczności naukowej. Prawdopodobnie w niedalekiej przyszłości możliwe będzie zbudowanie autonomicznego samolotu zdolnego w pełni do prowadzenia walki powietrze-powietrze i powietrze-ziemia.

Wyniki wskazują, że przedstawione podejście może być wykorzystane w budowie systemów automatycznego sterowania lotem. Chociaż manewry korkociągu lub Immelmanna nie mają zastoso-

Tab. 1. Ocena precyzji sterowania trajektorią podczas pętli.

Zadany promień [m]	Odchyłka od promienia [m]			Utracona wysokość [m]		
	R=150[m]	R=200	R=250	R=150	R=200	R=250
	14.0	17.5	19.0	1.83	3.05	6.40

wania w przypadku lotów pasażerskich lub towarowych, warto zastanowić się nad przedstawionym podejściem do syntezy algorytmów sterowania. Zastosowane algorytmy lub zasady ich projektowania mogą być wykorzystane do budowy systemu sterowania statkiem powietrznym pracującego w warunkach przeciągnięcia, korkociągu, a także w przypadkach stanów lotu, które mogą być skutkiem awarii systemów pokładowych lub wpływu turbulencji atmosfery na lot.

## Bibliografia:

1. Basmadji F.L., Gruszecki J., Rzucidlo P., Kordos D. (2012), Development of Ground Control Station for a Terrain Observer - Hardware in the Loop Simulations, AIAA-2012-4629, AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, Minneapolis, US, 13 – 16.08.2012.
2. Bates D., Hagström M. (2007), Nonlinear Analysis and Synthesis Techniques for Aircraft Control, ISBN 978-3-540-73718-6 Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
3. Biezad D. (1999), Integrated Navigation and Guidance Systems, AIAA Educational Series, ISBN1563472910.
4. Blajer W., Graffstein J., Krawczyk M. (2009), Modeling of aircraft prescribed trajectory flight as an inverse simulation problem, Modeling Simulation and Control of Nonlinear Engineering Dynamical Systems: State of The Art, Perspectives and Applications, Springer, p.153-162.
5. Blajer W., Graffstein J., Krawczyk M. (2008), Inverse Simulation Study of Aircraft in Prescribed Trajectory Flight, International Review of Mechanical Engineering, Nr. 1, Praise Worthy Prize, p.16-25, Naples. Bociek S., Gruszecki J. (1999), Układy sterowania automatycznego samolotem, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów.
6. Chudy, P., Dittrich, P., Rzucidlo, P. (2012), HIL Simulation of a Light Aircraft Flight Control System, Digital Avionics System Conference, AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference - Proceedings, art. no. 6382395, pp. 6D11-6D113, Williamsburg, VA, US, 2012, p. 1-11.
7. Dołęga B., Rogalski T. (2009), Control System for Medium-Sized Flying Target, Aviation. Vilnius: Technika, 2009, Vol. 13, No. 1, p.11-16. DOI: 10.3846/1648-7788, Vilnius.
8. Dołęga B., Rogalski T. (2009), Control System for Medium-Sized Flying Target, Aviation. Vilnius: Technika, 2009, Vol. 13, No. 1, p. 11-16. DOI: 10.3846/16487788, Vilnius.
9. Dołęga B., Rogalski T. (2004), The New Conception of The Laboratory Testing of the FBW Control Systems for Small Aircraft, Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal No 3, 2004, Emerald.
10. Kopecki G., Rogalski T. (2014), Aircraft attitude calculation with the use of aerodynamic flight data as correction signals Aerospace Science and Technology, Volume 32, Issue 1, Pages: 267-273, DOI: 10.1016/j.ast.2013.10.009.
11. Krawczyk M., Graffstein J., Maryniak J. (2005), Mathematical Model of UAV in Numerical Simulation of the Recovery Manoeuvres During Perturbed Flight, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Vol 38, No 1, s.121-130, PTMTiS.
12. Kuliberda M. (2015), Implementation of control algorithms for chosen aerobatic figures, diploma work supervised by T. Rogalski, Mechanical Faculty, Rzeszow University of Technology, Rzeszów.
13. Majka M., Rogalski T. (2014), Wykorzystanie oprogramowania Matlab do sterowania w czasie rzeczywistym modelem samolotu w symulatorze lotu, monografia ISBN 978-83-937270-0-1, Tomasz M. Majka Publisher, Tarnów.
14. McLean D. (1990), Automatics Flight Control Systems, Prentice Hall International Ltd, Cambridge (UK).
15. McRuer D., Ahkenas I., Graham D. (1973), Aircraft Dynamics and Automatic Control, ISBN 0-691-08083-6, Princeton University Press, Princeton (USA).
16. Milkiewicz A. (2009), Praktyczna aerodynamika i mechanika lotu samolotu odrzutowego w tym wysokomanewrowego, Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa.
17. Nowak D., Rogalski T. (2014). Możliwości wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych w polskiej przestrzeni powietrznej, Czasopismo Logistyka, Nr 6/2014, str. 7949-7955, ISSN 1231-5478.
18. Park S., Deyst J., How J. (2007). "Performance and Lyapunov Stability of a Nonlinear Path-Following Guidance Method", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*.
19. Pieniążek J. (2014). Kształtowanie współpracy człowieka z lotniczymi systemami sterowania, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, ISBN 9788371999127, Rzeszów.
20. Rogalski T. (2018), Unmanned aircraft automatic flight control algorithm in loop manoeuvre, Aircraft engineering and aerospace technology, ISBN/ISSN: 1748-8842, t.90, z.6, p.877-884.
21. Rogalski T., Nowak D., Pruchniak M., Prusik J. (2017), Układ automatycznego wykonywania manewru korkociągu, Autobusy – technika, eksploatacja, systemy transportowe, ISSN: 1509-5878, p. 1245-1251.
22. Rogalski T. (2010). The Control Algorithms for Manoeuvring Flying Target, Scientific Aspects of Unmanned Mobile Vehicles, t.1, s. 177-184, Politechnika Świętokrzyska, Kielce.
23. Rogalski T. (2008), Alternatywne sterowanie ruchem bocznym samolotu, Journal of Aeronautica Integra 1/2008 s. 99-103, Sieć Naukowa Aeronautica Integra, Oficyna Wydawnicza Politechniki rzeszowskiej, Rzeszów.
24. Rogers R., (2007), Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems, Third Edition, AIAA Educational series ISBN-13: 978-1563479274.
25. Rzucidlo P., Chudy P., Rydło K. (2013), Simulation and Prototyping of FCS for Sport Aircraft, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Volume 85 issue 6, Emerald Group Publishing Limited.
26. Rzucidlo P. (2013), Unmanned Air Vehicle Research Simulator - Prototyping and Testing of Control and Navigation Systems, Mechatronic Systems and Materials IV, Solid State Phenomena, Vol. 198, Trans Tech Publications Inc., Zurich 2013, pp. 266-274.
27. Seborg D. (2017), Process Dynamics and Control - 4th edition, ISBN10: 1119285917 John Wiley & Sons, Inc.
28. Stevens B., Lewis F. (1995). Aircraft Control and Simulation, Wiley & Sons.
29. Suzuki S., Sakamoto Y., Sanematsu Y, Takahara H. (2006) "Analysis of Human Pilot Control Inputs Using Neural Network", Journal of Aircraft, Vol. 43, No. 3 (2006), pp. 793-798. <https://doi.org/10.2514/1.16898>
30. Thompson P., McRuer D. (1988), "Comparison of the human optimal control and crossover models", Guidance, Navigation and Control Conference, Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences, <https://doi.org/10.2514/6.1988-418>.
31. Thompson S. Smith P. (2008), Air Combat Manoeuvres The technique and History of Air Fighting for Flight Simulation, Ian Allan Publishing, ISBN 9781903223949.
32. Trillas, E., Eciolaza, L. (2015), Springer International Publishing Switzerland
33. Williams N. (2003), Aerobatics, Airlife publishing Ltd, Great Britain, ISBN 0950454303

34. Zhou K., Doyle J. C. (1998), Essentials of Robust Control, Prentice-Hall, London
35. <http://www.x-plane.com/>. Official webpage of X-Plane simulator environment (contents on 01.05.2018).
36. [http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/reference\\_manual/DM00031020.pdf](http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/reference_manual/DM00031020.pdf) (contents on 01.06.2015).

---

#### Trajectory control during aerobatic flight

Paper discusses the problem of automatic flight control during selected aerobatic maneuvers. The exact process of control systems synthesis is discussed in works [13, 20, 21]. The nature of the maneuvers and the range of changes in flight parameters during their performance limit the possibility of using classic autopilot systems, as well as the possibility of obtaining accurate information about the exact aircraft's spatial orientation. Article presents an alternative

approach to the design of automatic aircraft control systems that can be applied in the discussed cases. The mentioned maneuvers were presented from the flight mechanics point of view. As well work shows the structure of control algorithms and the method of verifying their operation in simulation tests.

---

**Keywords:** autopilot, aerobatics, spin, Immelmann, simulation, Matlab, X-Plane.

#### Autorzy:

dr hab. inż. **Tomasz Rogalski** – Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Awioniki i Sterowania.

mgr inż. **Jacek Prusik** – Szkoła Doktorska Nauk Inżynieryjno - Technicznych na Politechnice Rzeszowskiej.