

SYMULACJA NUMERYCZNA UKŁADU WÓZEK-BSP W TRAKCIE STARTU Z WYRZUTNI MAGNETYCZNEJ

ANNA SIBILSKA-MROZIEWICZ, EDYTA ŁADYŻYŃSKA-KOZDRAŚ

Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki

e-mail: anna.mroziejewicz@pw.edu.pl; edyta.ladyzynska@pw.edu.pl

KRZYSZTOF SIBILSKI

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

e-mail: krzysztof.sibilski@pw.edu.pl

W pracy zaprezentowano analizę modelowania numerycznego układu wózka startowego wyrzutni magnetycznej oraz startującego z niej BSP. Program komputerowy do analizy dynamiki wózka startowego wyrzutni zaimplementowany został w środowisku MATLAB. Wyniki symulacji zobrazowano graficznie oraz jako animacje w Wirtualnej Rzeczywistości. Program wizualizacyjny został napisany w programie Unity i uruchamiany jest na goglach VR Oculus Quest2.

1. Wprowadzenie

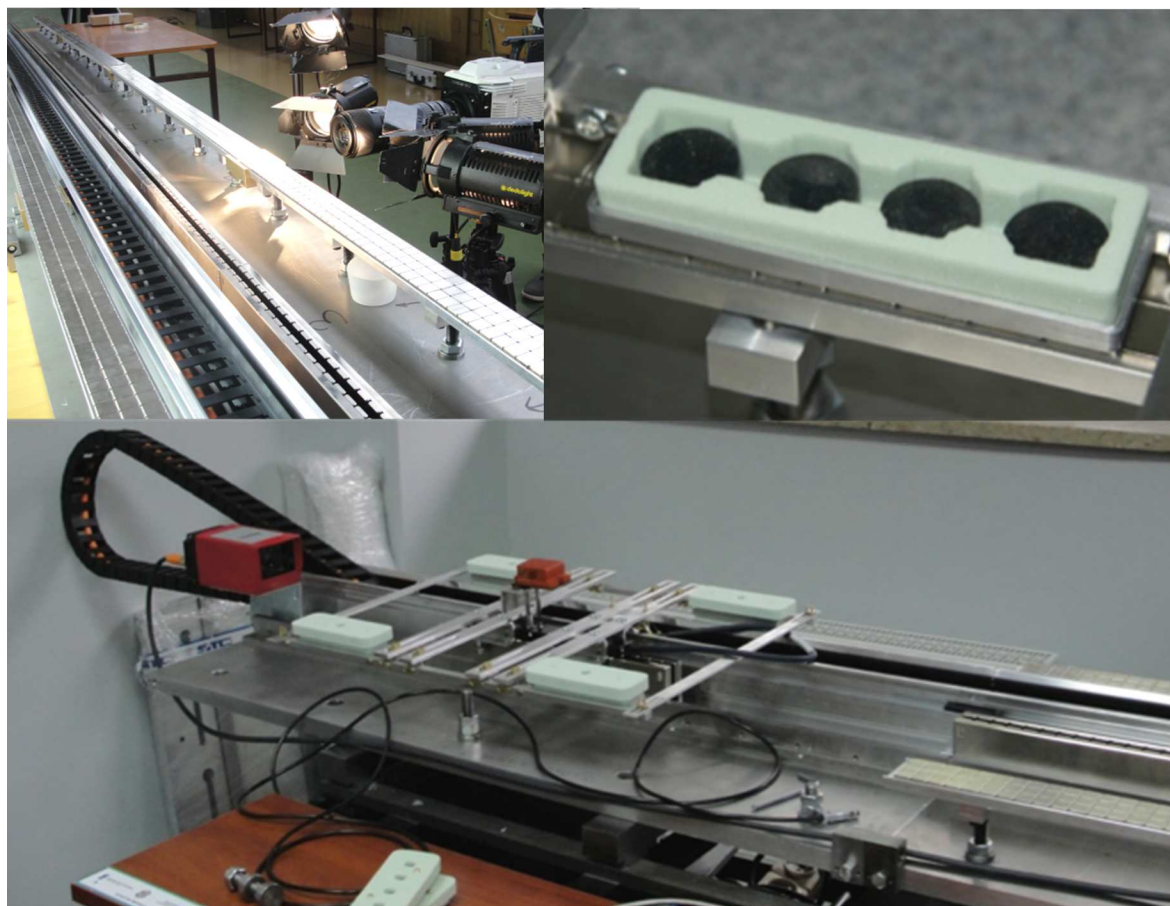
Start i lądowanie są jednymi z najistotniejszych manewrów wykonywanych przez każdy samolot, a szczegóły ich procedur zależą od klasy i typu samolotu. Zdecydowana większość samolotów transportowych i wojskowych wykorzystuje pasy startowe w celu rozwinięcia prędkości zapewniającej wystarczającą siłę nośną do uniesienia masy samolotu w trakcie startu lub wytracenia prędkości w chwili lądowania. W przypadku gdy samolot nie posiada układu podwozia lub warunki środowiskowe uniemożliwiają wygospodarowanie pasa startowego, np. podczas startu z lotniskowca konieczne jest wykorzystanie wyrzutni. Alternatywnym rozwiązaniem dla klasycznych katapult są wyrzutnie lewitacyjne, które pozwalają na osiągnięcie znacznie większych prędkości, umożliwiając jednocześnie bezkontaktowe sterowanie procesem startu statków powietrznych.

Przedmiotem badań jest model wyrzutni magnetycznej (rys. 1) zbudowany w ramach 7 PR UE GABRIEL (Integrated Ground and on-Board system for Support of the Aircraft safe Take-off and Landing) [1], [2]. Analizowana wyrzutnia jest innowacyjną alternatywą dla występujących komercyjnie wyrzutni samolotów bezzałogowych. Modułowa konstrukcja podstawy wyrzutni ułatwia transport i montaż urządzenia, do czego wymagane są jedynie dwie osoby obsługi.

Jak wykazały przeprowadzone dotąd badania [3], [4], możliwość rozpędzenia samolotu na dłuższej drodze startowej oferowanej przez wyrzutnię zmniejsza przeciążenia statku powietrznego występujące w trakcie startu, dzięki czemu wyrzutnia, samolot oraz sprzęt pokładowy są dużo bezpieczniejsze. Największą zaletą wyrzutni magnetycznej jest to, iż brak tarcia pomiędzy wózkiem startowym a wyrzutnią poprawia znacząco wydajność energetyczną układu.

W celu zobrazowania zachowania w czasie rzeczywistym elementów modelowanego układu wyrzutni magnetycznej przeprowadzono symulacje numeryczne procesu startu BSP z wyrzutni, a ich wyniki zaimplementowano w programie Wirtualnej Rzeczywistości (VR). Do głównych zalet tego rozwiązania należy możliwość:

- analizy zarówno położenia jak i orientacji samolotu oraz wózka,
- zmiany przez użytkownika perspektywy obserwacji sceny,



Rys. 1. Elementy wyrzutni magnetycznej GABRIEL w trakcie testów

- obserwacji abstrakcyjnych parametrów lotu,
- zatrzymywania, przewijania i zwalniania czasu symulacji w trakcie kluczowych momentów lotu.

2. VR w lotnictwie

Technologia VR (Virtual Reality) coraz śmielej wkracza do świata nauki i przemysłu, gdzie jest wykorzystywana w takich obszarach jak projektowanie i tworzenie modeli produktów, ich serwis, a także szkolenie pracowników. Ogromny potencjał VR związany jest z faktem, że oddziałuje na wszystkie zmysły użytkownika, zapewniając jednocześnie oszczędność czasu i redukcję kosztów.

Wirtualna rzeczywistość jest już stosowana szeroko jako narzędzie edukacyjne podczas szkolenia załogi samolotu [5]-[10] oraz personelu lotniska [11]-[16]. Na rys. 2 przedstawiono widok komercyjnej aplikacji Flying Aces: Navy Pilot Simulator dostępnej na platformie Oculus oraz STEAM, w której użytkownik steruje samolotem F-18 Super Hornet w trakcie lądowania na lotniskowcu [5]. Na rysunku 3 pokazano aplikację szkoleniową pracowników kontroli lotów na lotniskach Air Traffic Control Simulator dostępną na platformie SideQuest [11]. Na rysunku 4 widoczne są aplikacje szkoleniowe skierowane dla obsługi naziemnej lotniska [12].

Treningowe programy VR pozwalają na zapoznanie się użytkownika z obsługą samolotu bądź panelu sterującego, symulację szerokiej gamy zdarzeń w trakcie lotu, w tym awarii oraz wyrobieniu efektu pamięci mięśniowej. W porównaniu do tradycyjnych symulatorów programy VR



Rys. 2. 2. Flying Aces: Navy Pilot Simulator [5]



Rys. 3. ATC VR – Air Traffic Control Simulator [11]



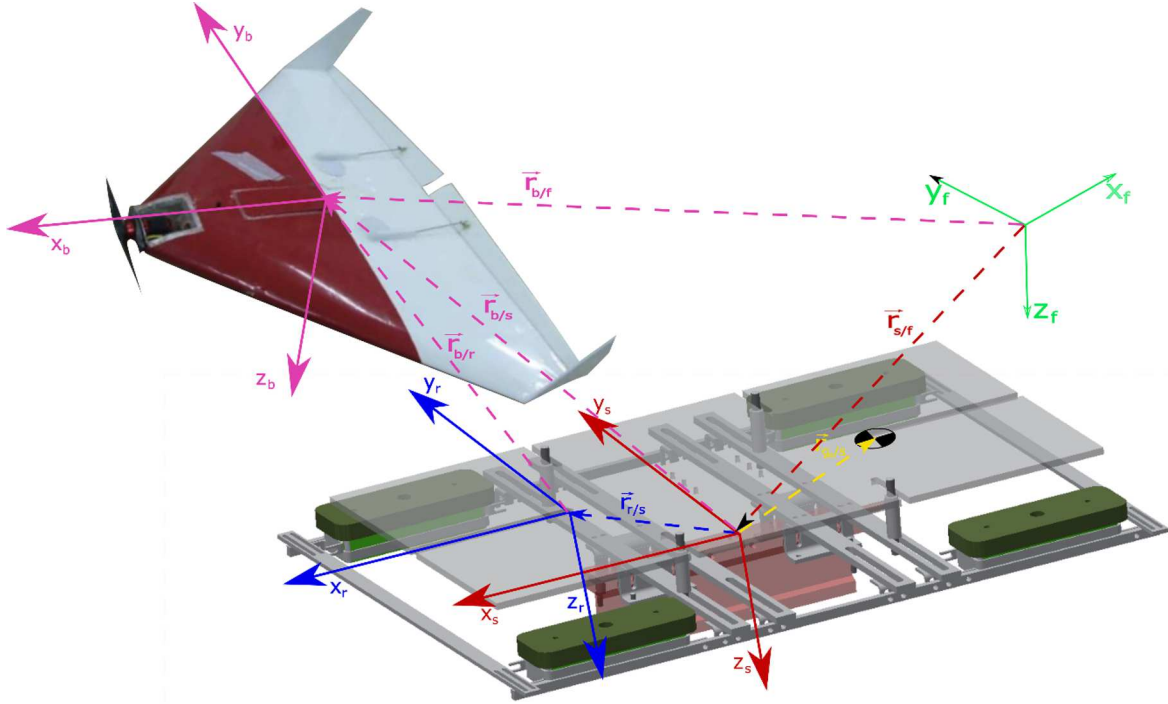
Rys. 4. Airport Ground Handling Simulator VR [12]

znacząco minimalizują koszt i czas implementacji oraz ograniczają niezbędny sprzęt. Dodatkowo postępy osoby szkolonej mogą być monitorowane i automatycznie oceniane.

Z drugiej strony technologię VR coraz częściej wykorzystuje się do tworzenia modeli i wizualizacji 3D umożliwiających stworzenie wirtualnego prototypu. Podczas symulacji zachowania się produktu można sprawdzić, czy prototyp spełnia wszystkie założone kryteria i wymagania dotyczące funkcjonalności, ergonomii i bezpieczeństwa. Dzięki wielokrotnemu tworzeniu i poprawianiu prototypu z zastosowaniem wizualizacji produkt szybciej pojawia się na rynku. W dodatku wykorzystanie VR pomaga zmniejszyć koszty prototypowania oraz usprawnić proces analizowania i ulepszania projektu na podstawie uwag potencjalnych użytkowników lub cenzorów.

3. Model symulacyjny wyrzutni magnetycznej

W układzie modelowanej wyrzutni magnetycznej wyróżnić można trzy podstawowe elementy: nieruchomą podstawę wyrzutni z zamontowanymi na stałe torami generującymi pole magnetyczne, lewitujący ponad torami wózek startowy oraz startujący BSP. Na rys. 5 przedstawiono elementy wyrzutni wraz z położeniem głównych układów współrzędnych wykorzystanych do opisu jej dynamiki. Są to układ inercyjny $O_f x_f y_f z_f$ oraz równoległy do niego układ magnetyczny $O_m x_m y_m z_m$ związany z torami wyrzutni, układ wózka startowego $O_s x_s y_s z_s$ oraz układ bryły samolotu $O_b x_b y_b z_b$.



Rys. 5. Wzajemne usytuowanie układów odniesienia modelowanej wyrzutni magnetycznej

Stosując metody modelowania dynamiki ciała sztywnego oraz mechaniki lotu, a także podstawowe prawa elektromagnetyzmu i nadprzewodnictwa, wyprowadzono model matematyczny dynamiki ruchu układu BSP-wózek startowy-tory wyrzutni magnetycznej [17]. Ma on postać wygodnych w implementacji numerycznej macierzowych równań ruchu opisanych w lokalnym, ruchomym układzie związanym z analizowanym obiektem. Równania dynamiki układu wózek-BSP podczas startu z wyrzutni przyjmują postać (3.1), przy czym w poniższym układzie górne indeksy wektorów i tensorów oznaczają układ współrzędnych, w którym opisano dany wektor, natomiast dolne indeksy informują o tym początek którego układu i względem którego układu jest opisywany

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} (m_{(s)} + m_{(b)})\mathbf{I} & -m_{(s)}\mathcal{S}(r_{g_s/s}^s) - m_{(b)}\mathcal{S}(r_{g_b/s}^s) \\ m_{(s)}\mathcal{S}(r_{g_s/s}^s) + m_{(b)}\mathcal{S}(r_{g_b/s}^s) & \mathcal{J}_{(s)s}^s + \mathcal{J}_{(b)s}^s - m_{(b)}[\mathcal{S}(r_{g_b/b}^s)\mathcal{S}(r_{b/s}^s) + \mathcal{S}(r_{b/s}^s)\mathcal{S}(r_{g_b/b}^s)] \end{bmatrix} \\
 & \cdot \begin{bmatrix} a_{s/f}^{s(ff)} \\ \varepsilon_{s/f}^{s(f)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\mathcal{S}(\omega_{s/f}^s[m_{(s)}\mathcal{S}(r_{g_s/s}^s) + m_{(b)}\mathcal{S}(r_{g_b/s}^s)]\omega_{s/f}^s \\ \mathcal{S}(\omega_{s/f}^s[\mathcal{J}_{(s)s}^s + \mathcal{J}_{(b)s}^s - m_{(b)}(\mathcal{S}(r_{g_b/b}^s)\mathcal{S}(r_{b/s}^s) + \mathcal{S}(r_{b/s}^s)\mathcal{S}(r_{g_b/b}^s)])\omega_{s/f}^s] \end{bmatrix} \\
 & = \begin{bmatrix} F_{(s)}^s + F_{(b)}^s \\ M_{(s)s}^s + M_{(b)b}^s + \mathcal{S}(r_{b/s}^s)F_{(b)}^s \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

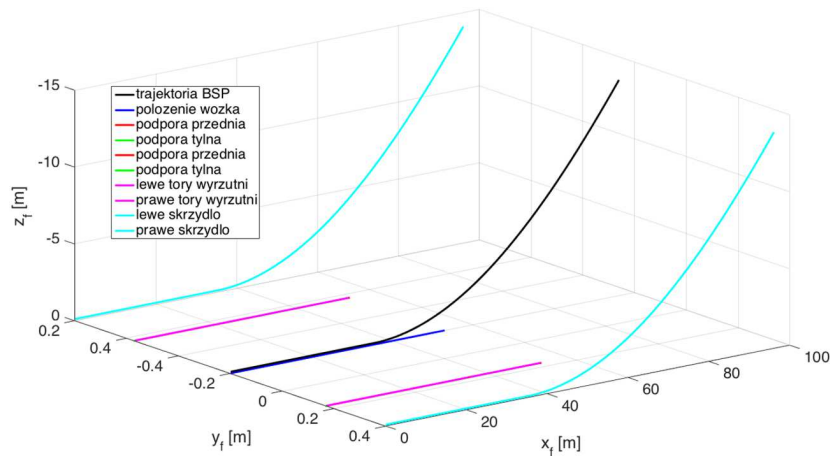
gdzie: $\mathbf{I}$ – macierz jednostkowa o wymiarze 3×3 ; $m_{(s)}$, $m_{(b)}$ – odpowiednio masa wózka startowego i BSP; $\mathcal{J}_{(s)s}^s$, $\mathcal{J}_{(b)s}^s$ – tensory bezwładności wózka i BSP w układzie $O_s x_s y_s z_s$; $\mathcal{S}(r_{g_s/s}^s)$, $\mathcal{S}(r_{g_b/s}^s)$ – tensory antysymetryczny wektora przesunięcia środka masy wózka i BSP w układzie $O_s x_s y_s z_s$; $a_{s/f}^{s(ff)}$, $\varepsilon_{s/f}^{s(f)}$ – bezwzględne przyspieszenie liniowe i kątowe układu wózek-BSP; $\omega_{s/f}^s$ – bezwzględna prędkość kątowa układu wózek-BSP; $F_{(s)}^s$, $F_{(b)}^s$, $M_{(s)s}^s$, $M_{(b)s}^s$ – siły i momenty sił działające na wózek i BSP analizowane w układzie $O_s x_s y_s z_s$.

Proces modelowania sił i momentów sił działających na układ wyrzutni został szczegółowo omówiony w pracy [18]. W przeprowadzonych tam analizach zwrócono uwagę na wzajemne interakcje oddziaływań i ich wpływ na proces startu BSP. Ma to istotne znaczenie dla bezpieczeństwa eksploatacji wyrzutni ze względu na wartości sił i momentów sił powstających w wyniku wzajemnego oddziaływania startującego BSP z ramą wózka, a przez to z torami magnetycznymi.

Program komputerowy przeznaczony do analizy dynamiki ruchu układu wyrzutni magnetycznej zaimplementowano w środowisku MATLAB. Model symulacyjny sformułowano jako zagadnienie początkowe równań różniczkowych zwyczajnych (3.1) uzupełnione o związki kinematyczne i geometryczne analizowanego układu wyrzutni. Do przeliczenia modelu wykorzystano algorytm całkowania numerycznego, bazujący na metodzie Rungego Kutty 4 rzędu. Wartość siły lewitacji aproksymowana została na podstawie badań doświadczalnych opisanych w pracy [4] oraz analizy pola magnetycznego, generowanego przez tory wyrzutni.

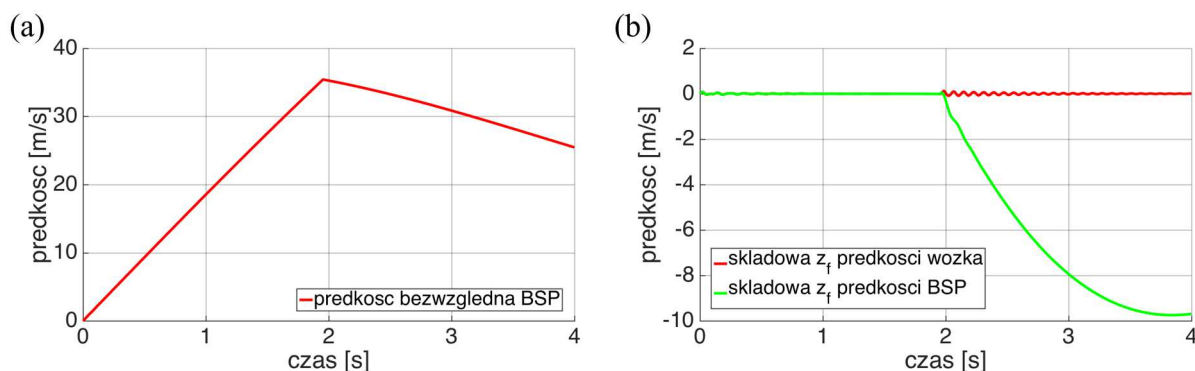
Przykładową symulację numeryczną przeprowadzono dla przypadku startu testowego BSP klasy mikro Bullit o masie 1,2 kg i rozpiętości skrzydeł 0,84 m [19]. Zgodnie z procedurą startu założono, że w chwili początkowej samolot posadowiony jest na platformie startowej na wysokości 0,1 m ponad wózkiem startowym. Masę wózka startowego przyjęto jako równą 1,4 kg. Start przeprowadzono dla przypadku, w którym wózek napędzany jest przez pierwsze 2 s siłą 50 N, a następnie jest hamowany do chwili zatrzymania siłą –60 N. Start odbywa się przy wyłączonym napędzie BSP.

Jak wynika z symulacji, których wyniki zestawiono na rys. 5-7, oderwanie samolotu nastąpiło w chwili $t = 1,95$ s po przebyciu 35 m. Na rys. 5 obrazującym trajektorię ruchu BSP oraz wózka w trakcie startu granatową linią zaznaczony został ruch środka masy wózka, widoczne po lewej i prawej stronie różowe przebiegi odzwierciedlają położenie podpór wózka. Położenie środka masy samolotu zaznaczono linią czarną, natomiast linie niebieskie opisują położenie końcówek skrzydeł BSP. W chwili oderwania samolot osiągnął prędkość 35,4 m/s (rys. 6a), którą następnie wytraca (ze względu na założony w symulacji brak napędu).

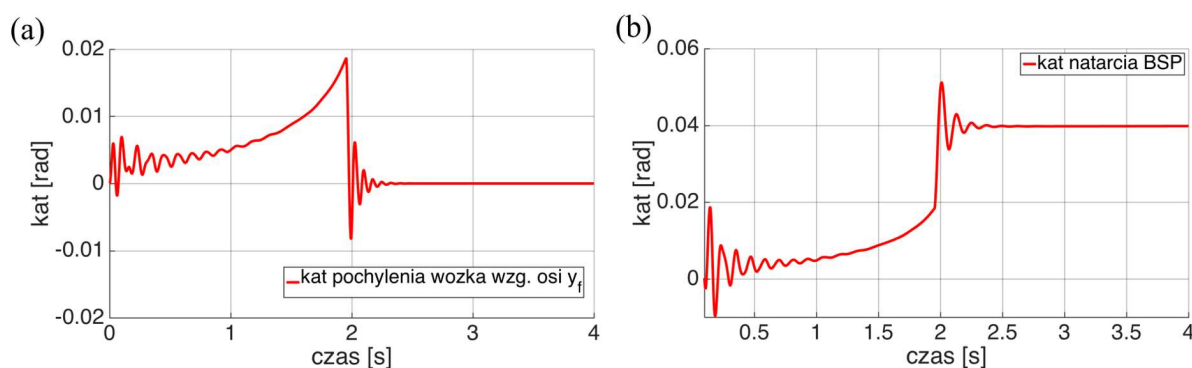


Rys. 6. Trajektoria BSP i wózka startowego podczas startu

Rysunek 6b przedstawia przebieg zmian składowej prędkości wózka i samolotu względem osi z_f inercyjnego układu współrzędnych, co odpowiada składowej pionowej prędkości wózka



Rys. 7. Przebieg zmian: (a) prędkości bezwzględnej BSP podczas startu oraz (b) składowej prędkości wózka i samolotu względem osi z_f inercyjnego układu współrzędnych



Rys. 8. Przebieg zmian kątów: (a) pochylenia wózka startowego oraz (b) natarcia BSP

startowego oraz prędkości wznoszenia samolotu. Amplituda prędkości pionowej wprowadzonego w drgania wózka nie przekraczała 0,1 m/s. Prędkość wznoszenia BSP po oderwaniu ma wartość ujemną, a więc samolot wznosi się ponad torami. W chwili oderwania wózek startowy zostaje wprowadzony w słabo tłumione drgania wokół położenia równowagi na wysokości $h_0 = 6,6$ mm.

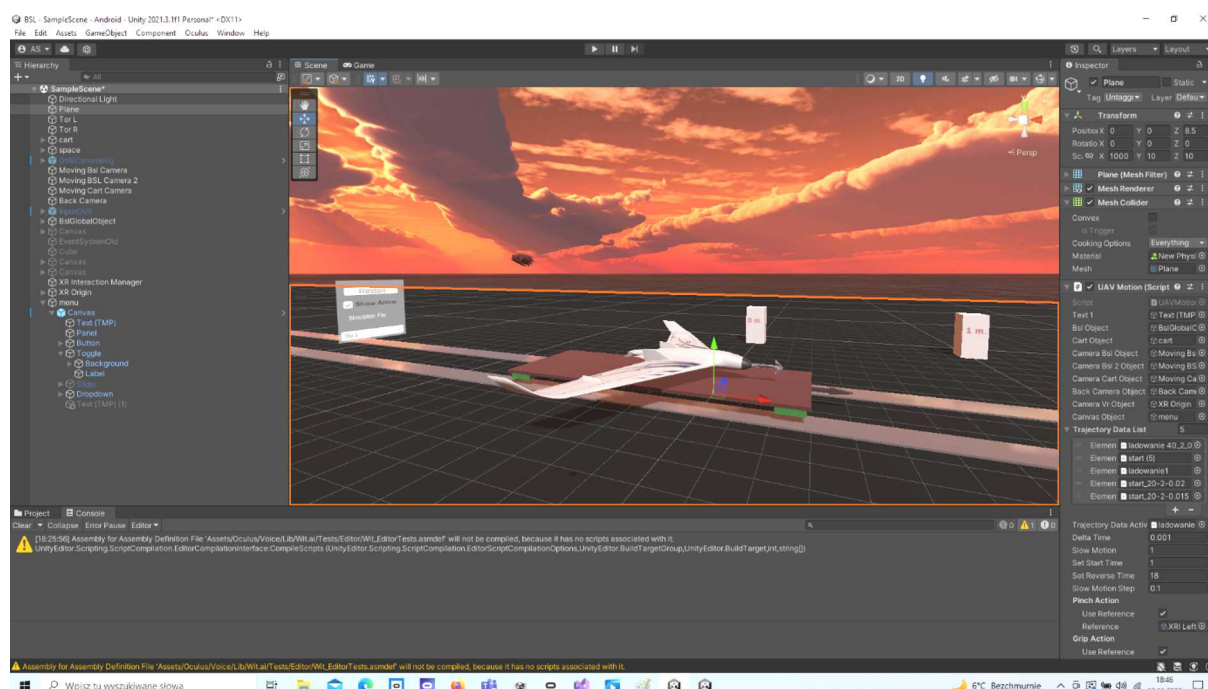
Kąt pochylenia wózka (rys. 7a) narasta aż do chwili startu BSP, a po starcie stabilizuje się wokół zera. Z ruchu pochyłającego wózka startowego wynikają podczas startu drgania kąta natarcia BSP (rys. 7b). Kąt natarcia BSP w trakcie wznoszenia stabilizuje się na poziomie 0,041 rad.

4. Wizualizacja ruchu układu BSP-wózek startowy w VR

W związku z pracami w projekcie badawczym BEYOND POB realizowanym w Politechnice Warszawskiej w ramach projektu „Inicjatywa doskonałości – uczelnia badawcza”, zaprojektowano i wykonano program wizualizacyjny VR, który umożliwia analizę wyników symulacji numerycznych przeprowadzonych w MATLAB. Połączenie wykresów parametrów ruchu samolotu oraz wózka wygenerowanych w MATLAB wraz z animacją VR pokazującą wzajemne ich położenie i orientację daje pełny wgląd w dynamikę systemu. Program zaimplementowano w środowisku Unity [20] – jednym z czołowych silników do tworzenia gier komputerowych oraz innych materiałów interaktywnych. Proces implementacji interaktywnych funkcji związanych z wirtualną rzeczywistością, takich jak obsługa GUI za pomocą kontrolerów, został ułatwiony dzięki wykorzystaniu gotowych komponentów biblioteki XR Interaction Toolkit.

Program został zainstalowany i uruchomiony (rys. 9) na goglach VR Oculus Quest 2. Gogle te są samodzielne, tzn. nie wymagają mocy obliczeniowej komputera. W skład zestawu VR wcho-

dążą gogle o rozdzielczości 3664x920 (1832x1920 na każde oko) oraz częstotliwości odświeżania 90 Hz oraz 2 kontrolery umożliwiające śledzenie dłoni użytkownika z zestawem interaktywnych przycisków (zdjęcie zestawu).



Rys. 9. Środowisko Unity z implementacją programu



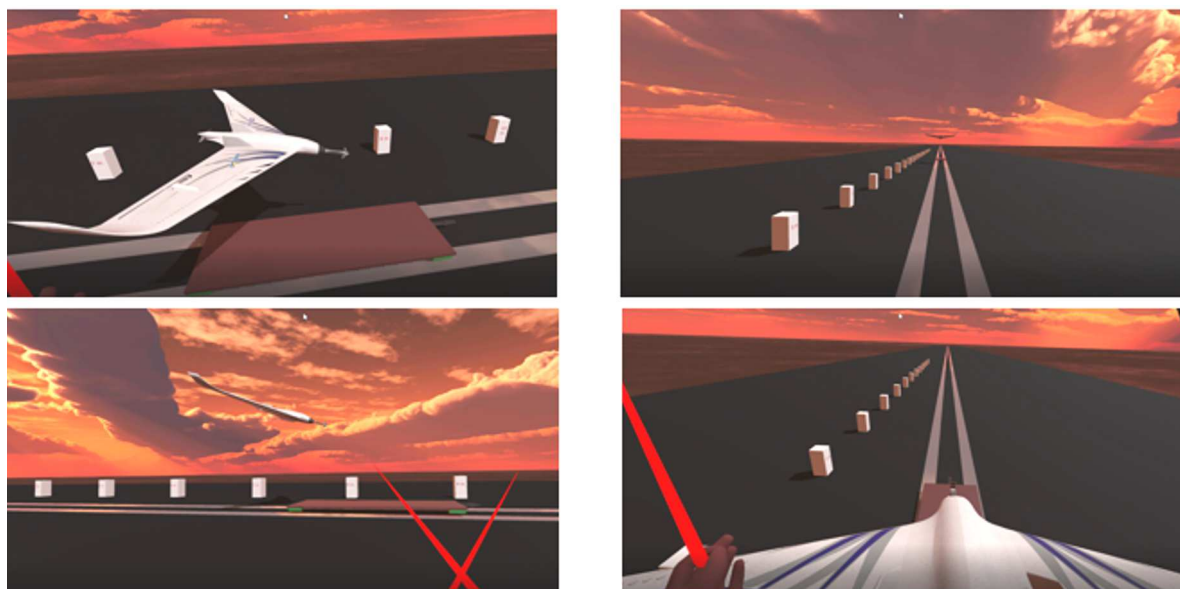
Rys. 10. Obsługa aplikacji za pomocą kontrolerów VR

W zaimplementowanej aplikacji użytkownik za pomocą kontrolerów (rys. 10) może sterować czasem symulacji. Może on zatrzymać symulację w wybranym momencie, przewinąć ją oraz obejrzeć w zwolnionym tempie. Aby zatrzymać lub przewinąć symulację, użytkownik musi wciśnąć przycisk znajdujący się pod wskazującym palcem. Lekkie naciśnięcie przycisku spowoduje zatrzymanie symulacji, a mocniejsze jej przewinięcie. Prędkość symulacji zależy od siły przy-

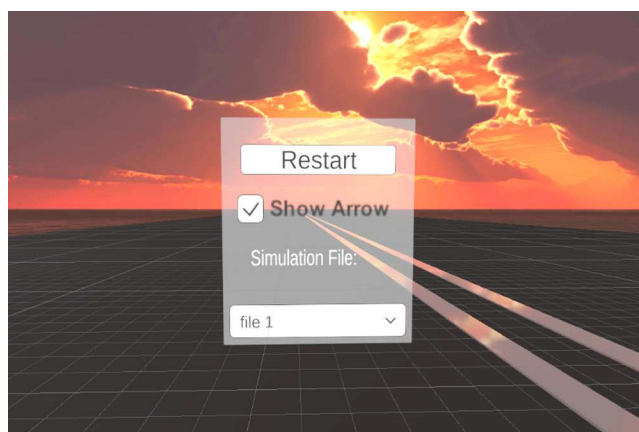
ciśnięcia przycisku znajdującego się pod środkowym palcem lewej ręki użytkownika. Im silniej zostanie on wciśnięty, tym bardziej spowalnia działanie programu. Dodatkowo może pojawić się sprzężenie haptyczne (drgania kontrolerów) w wybranym momencie symulacji, np. w chwili zetknięcia samolotu z wózkiem.

W implementacji programu uwzględniono możliwość zmiany położenia kamery obserwującej scenę. W tym celu użytkownik musi wybrać jeden z guzików X/Y/A/B na obu kontrolerach. W ramach prac zaimplementowano 5 pozycji kamery:

- domyślna nieruchoma ustawiona prostopadłe do torów w miejscu położenia początkowego wózka,
- po wciśnięciu X – ruchoma kamera prostopadła do torów śledząca ruch samolotu,
- po wciśnięciu Y – ruchoma kamera prostopadła do torów śledząca ruch wózka,
- po wciśnięciu A – nieruchoma kamera równoległa do torów ustawiona w położeniu początkowym wózka,
- po wciśnięciu B – ruchoma kamera równoległa do torów śledząca ruch samolotu ustawiona ponad dziobem.



Rys. 11. Pozycje kamery odpowiadające przyciskom X/Y/A/B



Rys. 12. Interfejs użytkownika VR

Niezależnie od wybranej pozycji kamery, jeżeli użytkownik obróci w lewo głowę zobaczy interfejs użytkownika (rys. 12), za pomocą którego może zrestartować symulację oraz wybrać wygenerowany przez MATLAB plik z wynikami symulacji.

5. Podsumowanie – przyszły rozwój aplikacji VR

Zaprezentowane w pracy połączenie wyników symulacji numerycznej w MATLAB z ich animacją w wirtualnej rzeczywistości stanowi nowatorskie podejście do analizy dynamiki obiektów ruchomych. Połączenie wykresów wygenerowanych w MATLAB parametrów startującego BSL i lewitującego nad torami wózka wraz z animacją VR wzajemnego ich położenia i orientacji daje pełny wgląd w dynamikę układu wyrzutni magnetycznej.

W ramach przyszłych prac interfejs użytkownika umożliwi również włączanie/wyłączanie wizualizacji parametrów ruchu samolotu i wózka, w tym strzałki przedstawiającej wektor prędkość lub przyspieszenia wózka i samolotu oraz kąt przestrzenny pokazujący orientację elementów wyrzutni magnetycznej, w szczególności kąt natarcia i ślizgu samolotu. Dodatkowo będą wyświetlane wartości numeryczne symulacji, np. odległość pomiędzy samolotem a wózkiem.

Badania były finansowane ze środków Politechniki Warszawskiej w ramach Programu Inicjatywa Doskonałości - Uczelnia Badawcza (IDUB).

Bibliografia

1. Integrated Ground and on-Board system for Support of the Aircraft Safe Take-off and Landing [dostęp 15.01.2023], <https://cordis.europa.eu/article/id/92581-magnetic-takeoff-and-landing-for-fuelefficient-aircraft/pl>
2. ROHACS D., ROHACS J., 2016, Magnetic levitation assisted aircraft take-off and landing (feasibility study GABRIEL concept), *Progress in Aerospace Sciences*, **85**, 33-50
3. ŁADYŻYŃSKA-KOZDRAŚ E., SIBILSKA-MROZIEWICZ A., CZUBAJ S.K., FALKOWSKI K., SIBILSKI K., WRÓBLEWSKI W., 2017, Take-off and landing magnetic system for UAV carriers, *Journal of Marine Engineering and Technology*, **16**, 4, 298-304
4. SIBILSKA-MROZIEWICZ A., ŁADYŻYŃSKA-KOZDRAŚ E., FALKOWSKI K., SIBILSKI K., 2020, Estimation of the force causing the levitation of the starting trolley of the unmanned aerial vehicle, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, **68**, 5, 1177-1185
5. Flying Aces – Navy Pilot Simulator [dostęp 15.01.2023], https://store.steampowered.com/app/837430/Flying_Aces_Navy_Pilot_Simulator
6. TRINON H., 2019, Immersive technologies for virtual reality-case study: Flight simulator for pilot training, [dostęp 15.01.2023], <https://matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/6443/4/MasterThesis-Trinon-Helene.pdf>
7. GARCIA A.D., SCHLUETER J., PADDOCK E., 2020, Training astronauts using hardware-in-the-loop simulations and virtual reality, *AIAA Scitech 2020 Forum*
8. XUE S.U.N., ET AL., 2020, Team effectiveness evaluation and virtual reality scenario mapping model for helicopter emergency rescue, *Chinese Journal of Aeronautics*, **33**, 12, 3306-3317
9. TRINON H., 2019, Immersive technologies for virtual reality-case study: Flight simulator for pilot training, *Computer Science*
10. SAKIB MD N., ET AL., 2020, An experimental study of wearable technology and immersive virtual reality for drone operator training, *Proceedings of the EG-ICE 2020 Workshop on Intelligent Computing in Engineering*, Berlin, Germany

11. ATC VR – Air Traffic Control Simulator [dostęp 15.01.2023],
<https://sidequestvr.com/app/1906/atc-vr-air-traffic-control-simulator>
12. Just Flight, Airport Ground Handling Simulator VR [dostęp 15.01.2023],
<https://www.justflight.com/product/airport-ground-handling-simulator-vr>
13. TIAN Y., ET AL., 2019, Research on 3D virtual training courseware development system of civil aircraft based on virtual reality technology, *Proceedings of the 2019 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality*
14. BUTTUSSI F., CHITTARO L., 2020, A comparison of procedural safety training in three conditions: virtual reality headset, smartphone, and printed materials, *IEEE Transactions on Learning Technologies*, **14**, 1, 1-15
15. ZE L., LIJIE C., BO R., 2020, Study on the virtual simulation training system for SCS maintenance, *2020 International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems (ICVRIS). IEEE*
16. WU W.-C., VU V.-H., 2022, Application of virtual reality method in aircraft maintenance service taking Dornier 228 as an example, *Applied Sciences*, **12**, 14, 7283
17. SIBILSKA-MROZIEWICZ A., ŁADYŻYŃSKA-KOZDRAŚ E., 2018, Mathematical model of levitating cart of magnetic UAV catapult, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, **56**, 793-802
18. SIBILSKA-MROZIEWICZ A., ŁADYŻYŃSKA-KOZDRAŚ E., FALKOWSKI K., 2020, Modelling of forces acting on a system of the UAV launcher, based on passive magnetic suspensions with superconductors, *Nase More*, **67**, 1, 60-68
19. KONDRATIUK M., AMBROZIAK L., 2016, Concept of the magnetic launcher for medium class unmanned aerial vehicles designed on the basis of numerical calculations, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, **54**, 1, 163-177
20. Unity Real-Time Development Platform 3D, 2D VR & AR Engine [dostęp 15.01.2023],
<https://unity.com/>

Numerical simulations of a cart-UAV system during take-off from a magnetic launcher

The paper analyses the results of numerical simulations of the cart of a magnetic launcher and UAV during the taking-off procedure. A computer program for analyzing the system dynamics was implemented in the MATLAB environment. Simulation results were visualized graphically and in form of animations in Virtual Reality. The VR application was implemented into Unity software and ran on VR goggles Oculus Quest2.