

Dr hab. inż. Cezary SZCZEPAŃSKI
Profesor
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra SZCZERBY
p.t. „WYKORZYSTANIE SYGNAŁÓW WIZYJNYCH DO
STEROWANIA SAMOLOTEM PODCZAS WYPROWADZANIA Z
KORKOCIĄGU”

Recenzję sporządzono na podstawie pisma RM-530-05-03-2019 z dnia 11.07.2019 z Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.

Rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Szczerby pod tytułem „Wykorzystanie sygnałów wizyjnych do sterowania samolotem podczas wyprowadzania z korkociągu” zawiera siedem rozdziałów, wykaz ważniejszych symboli i oznaczeń oraz skrótów i akronimów, wykaz literatury, a także streszczenia w języku polskim i angielskim. Przedstawiona została na 199 stronach, zaś wykaz zacytowanej literatury liczy 110 pozycji.

Pracę rozpoczyna krótki „Wstęp”, w którym Autor opisuje ogólne tło i przyczyny, z powodu których podjął badania nad przetwarzaniem obrazów, mające wspomagać pilotowanie samolotu, a w szczególności wspierać pilota w wyprowadzeniu samolotu z nietypowego stanu lotu, jakim jest korkociąg.

Rozdział 1 „Wprowadzenie teoretyczne do pracy”, zawiera tezę i opis problematyki, określenie celu i zakresu pracy, a także omówienie jej zawartości. W jednym z początkowych podrozdziałów Doktorant prezentuje motywacje do podjęcia badań nad korkociągiem, w tym jego udziału jako przyczyny wypadków w Lotnictwie

Lekkim (General Aviation). Kolejny podrozdział wypełnia przegląd historycznego rozwoju badań korkociągu jako zjawiska wpływającego na konstrukcje statków powietrznych oraz ich pilotowanie. Omówiono tu pokrótce metody badań korkociągu w tunelach aerodynamicznych, podczas testowych lotów rzeczywistych samolotów oraz za pomocą analiz numerycznych metodami Computer Fluid Dynamics - CFD.

Rozdział 2, zatytułowany „Zależności związane z analizą ruchu przestrzennego samolotu”, rozpoczyna podrozdział precyzujący układy odniesienia przyjęte do dalszych badań. Drugi i ostatni podrozdział zawiera opis klasycznego układu sterowania lotem samolotu, jaki będzie przyjęty do dalszych badań.

Rozdział 3, zatytułowany „Zachowanie samolotu w korkociągu”, poświęcony został szczegółowemu opisowi i analizie korkociągu. Rozpoczyna go analiza stateczności i sterowności samolotu. Autor przeprowadza dyskusję przypadków stateczności statycznej i dynamicznej, podając przykłady ich analizy wraz ze zjawiskami je wywołującymi. Pojawia się tu drobna niekonsekwencja. Autor pisze o stateczności względem trzech osi samolotu, wylicza je, a na koniec dodaje jeszcze pojęcie stateczności bocznej, nie komentując jej w tym zestawieniu.

W kolejnym podrozdziale autor omawia szczegółowo zjawiska związane z wykonywaniem lotów na krytycznych kątach natarcia. Dalej prowadzona jest analiza zjawisk doprowadzających do wejścia samolotu w korkociąg: przeciągnięcia samolotu i autorotacji. W opisie doprowadzenia do przeciągnięcia samolotu pojawia się błąd na s.39, gdzie zamiast steru wysokości pojawia się ster kierunku („podciąganie drążka sterowniczego na siebie ... skutkuje wychyleniem ... steru kierunku”). Podobnie nieprawidłowe jest odwołanie do rys.3.7 zamiast 3.8 umieszczone na s.42.

Następny podrozdział 3.5 poświęcony jest szczegółowemu opisowi zjawiska korkociągu samolotu. Także w tym miejscu pojawiają się błędy redakcyjne, jak np. na s.45 „W korkociągu stromym ... promień spirali jest o wiele mniejszy niż w przypadku korkociągu stromego”. Jednak od strony fizyki zjawiska opisy są poprawne. Można więc przyjąć, że jest to błąd typu redakcyjnego. Nie opisano także osi na rys.3.14, chociaż można się domyślać w jakich jednostkach są one wyskalowane. Jedynie w przypadku wychyleń sterów powstaje wątpliwość dotycząca wartości tych wychyleń. Na s.57 pojawia się odwołanie do nieokreślonego rys.3.wq oraz niejasny wstęp do opisu rys.3.21, jednak szczegółowy opis zjawisk fizycznych, których dotyczy rysunek umożliwia zrozumienie myśli Autora. W efekcie przeprowadzonych analiz Doktorant

sformułował model matematyczny zjawiska korkociągu, który będzie badał w dalszej części pracy.

W rozdziale 4, zgodnie z jego tytułem „Sygnały wizyjne w manewrze wyprowadzenia z korkociągu”, Autor po krótkim wprowadzeniu do układów wizyjnych jako narzędzi wspomagających sterowanie obiektami ruchomymi, przedstawia ideę opracowanego przez siebie sposobu wyprowadzania samolotu z korkociągu z wykorzystaniem obrazu pochodzącego z układu wizyjnego zabudowanego na pokładzie samolotu.

Kluczową częścią tego rozdziału, a za razem całej pracy, jest koncepcja rozwiązania zaproponowanego przez Doktoranta. Na podstawie przeprowadzonej analizy Autor stwierdził, że podczas korkociągu zarówno pilot samolotu jak też naziemny pilot-operator bezzałogowego statku powietrznego – BSP, opierają się przede wszystkim na informacjach wzrokowych o stanie lotu. Tak więc obaj sterują statkiem powietrznym w ten sam sposób. Autor zaproponował więc zastosowanie analogicznego podejścia do opracowania układu automatycznie wyprowadzającego samolot załogowy czy bezzałogowy z korkociągu. Założył więc system składający się z układów: optycznego, wizyjnego oraz sterowania, który będzie w stanie wyprowadzić samolot z korkociągu lub co najmniej wspomóc pilota, statku załogowego lub bezzałogowego, w wykonaniu tego zadania. Układ optyczny to kamera z przetwornikiem obrazu na postać cyfrową. Układ wizyjny to zespół algorytmów przetwarzających informację cyfrową o obrazie na sygnały dla układu sterowania lotem. I w końcu układ sterowania lotem z interfejsem do układu wizyjnego, sterujący typowymi powierzchniami sterującymi samolotu: sterami wysokości i kierunku oraz lotkami. Zaproponowany algorytm sterowania lotem samolotu podczas identyfikacji i wyprowadzania z korkociągu bazuje na typowej procedurze tego manewru wykonywanego przez pilotów. Autor zalgorytmizował tę procedurę i opracował algorytm bazujący wyłącznie na informacjach obrazowych uzyskanych przez układ elektrooptyczny zabudowany na pokładzie samolotu, do sterowania podczas wyprowadzania samolotu z korkociągu. Jako rozwiązanie systemu mogące znaleźć zastosowanie praktyczne Doktorant zaproponował strukturę hybrydową sterującą wyprowadzaniem samolotu z korkociągu. Uzasadnił to niemożnością wykorzystania klasycznych metod sterowania, w których niezbędna jest znajomość dokładnych wartości sterowanych parametrów, w tym przypadku prędkości kątowych samolotu. Dodatkowym czynnikiem przemawiającym za zastosowaniem układu sterowania

hybrydowego jest homogeniczne źródło informacji o ruchu samolotu – sensor optyczny, dający niepełne informacje ilościowe o ruchu samolotu.

Zaproponowany układ hybrydowy wykorzystywałby podejście sekwencyjne takie, jakie stosują piloci podczas wychodzenia z korkociągu. Dzięki temu Autor uzyskał połączenie regulatora programowego rozmytego z regulatorem klasycznym. Odpowiedni typ regulatora wchodziłby do pracy w zależności od wykrytego i zidentyfikowanego stanu lotu w korkociągu. Na jego początku działałby programowy regulator rozmyty, a podczas końcowej fazy wyprowadzania – regulator klasyczny. Autor przedstawił i przeanalizował strukturę takiego systemu sterowania oraz przedstawił idealne przebiegi sterowania podczas wyprowadzania samolotu z korkociągu. W dalszej części rozdziału Doktorant opisuje szczegółowo strukturę zaprojektowanego i wykonanego układu sterowania. Jego istotną częścią jest adaptacyjny układ wizyjny składający się z: elementu optycznego z przetwornikiem obrazu, układu akwizycji, układu obróbki przechwyconego obrazu oraz układu wizualizacji obrazu końcowego. Jedną z jego funkcji jest eliminacja zakłóceń optycznych wywołanych światłem słonecznym i oświetleniem sztucznym, wywołujących olśnienia.

W następnej części rozdziału znajdujemy szczegółowe opisy działania algorytmów przetwarzających obrazy odbierane przez kamerę pokładową na informacje przydatne do identyfikacji poszczególnych faz korkociągu oraz sterowania lotem w tych fazach.

Rozdział 5 „Badania laboratoryjne opracowanych układów” rozpoczyna Autor od omówienia celu i założeń badań laboratoryjnych, a następnie przechodzi do opisu stanowisk laboratoryjnych – uproszczonego i rozbudowanego badawczego symulatora lotu. Dalej znajdujemy szczegółowy opis metodyki przeprowadzonych badań, w tym analizy wirtualnego obrazu obserwowanego przez kamerę na stanowisku badawczym. Doktorant przeanalizował tu dokładnie przydatność metod przepływu optycznego oraz punktów charakterystycznych do określenia parametrów ruchu samolotu w korkociągu podczas badań symulacyjnych, a także podczas badań na rzeczywistym samolocie w locie. Wnioski z tych analiz pokrywają się z wynikami badań dotyczących sterowania ruchem innych typów obiektów bezzałogowych, w tym podwodnych.

Kończącą część rozdziału wypełniają wyniki badań laboratoryjnych oraz ich opis i analiza. Umożliwiły one określenie najlepszego ustawienia parametrów kamery w

połączeniu z jej lokalizacją na pokładzie samolotu. Najlepszymi położeniami kamery są, według badań, nos samolotu lub krawędź natarcia skrzydła, ewentualnie pod kadłubem z przodu samolotu. Dla poprawnego działania opracowanego algorytmu istotne jest, by w polu widzenia kamery nie znajdowały się stałe elementy obrazu, np. części kadłuba samolotu. Jest to bardzo ważne odkrycie z punktu widzenia aplikacji kamer dla takich zastosowań w praktyce sterowania ruchem obiektów, np. pojazdów lądowych. Pozytywnie zweryfikowano także zastosowanie w badaniach kamery sportowej klasy GoPro o kącie widzenia 120° do sterowania ruchem samolotu.

Niestety Autor nie ustrzegł się błędów redakcyjnych. W tej części pracy na stronie 141 pojawiło się określenie „najbardziej optymalnym położeniem kamery”, zawierające kilka błędów, tj. optymalny to najlepszy w danych warunkach, więc nie może być „najbardziej najlepszy”, ponadto pojęcie optymalności wymaga określenia jej warunków i kryteriów, czego tu nie znajdujemy. Na niektórych rysunkach opisy są nieczytelne, ze względu na ich wielkość. Powiększenie ich zwiększyłoby objętość pracy, lecz z pewnością ułatwiło jej czytanie.

Kolejny etap badań stanowiły testy na symulatorze lotu, przystosowanym do prowadzenia badań nad wizyjnym systemem sterowania lotem samolotu podczas wyprowadzania go z korkociągu. Badania przeprowadzono w dwu trybach: off-line na przygotowanych uprzednio plikach oraz on-line na streamingowanych danych z symulatora zsynchronizowanych z danymi przetwarzanymi przez algorytmy wizyjne, opracowane przez Doktoranta, w pakiecie Matlab/Simulink. Przeprowadzone badania wykazały skuteczność algorytmów wizyjnych opracowanych przez Autora:

- algorytmu adaptacyjnego, kompensującego zakłócenia lub zmieniające się oświetlenie analizowanej sceny, co ma miejsce podczas korkociągu,
- algorytmu sterującego lotem podczas korkociągu właściwego, wykrywającego stan lotu i określający jego parametry,
- algorytmu sterującego lotem podczas fazy lotu horyzontalnego, czyli podczas wyprowadzania samolotu z korkociągu.

Wskazano pewne ograniczenia warunków oświetlenia lub meteorologicznych, w których niektóre algorytmy miały trudności z prawidłowym działaniem, niemniej podano tu potencjalne sposoby wyeliminowania tych ograniczeń, np. poprzez zastosowanie kamer pracujących w innym paśmie niż zastosowane w ocenianych badaniach pasmo widzialne, a następnie fuzję danych z kilku takich źródeł. Przeprowadzone badania mają dużą wartość poznawczą i dzięki bardzo rzetelnemu

ich wykonaniu i udokumentowaniu stanowią dobrą podstawę do dalszych prac nad praktycznym zastosowaniem opracowanych algorytmów i całego systemu.

Rozdział 6 zatytułowany „Badania na rzeczywistym obiekcie” autor rozpoczyna od opisu urządzeń, za pomocą których zarejestrowano dane w locie rzeczywistego samolotu, niezbędne do oceny sterowania lotem podczas wyprowadzania z korkociągu. Podczas tych badań zweryfikowano w warunkach lotu rzeczywistego miejsce i sposób zamocowania kamery oraz jej parametry. Potwierdzono tu w pełni wyniki badań symulacyjnych w środowisku wirtualnym, przedstawionych w poprzednim rozdziale. Badano także efektywność opracowanych algorytmów sterowania wyprowadzaniem samolotu z korkociągu. Stwierdzono ich skuteczność podczas lotu nad trudnym dla identyfikacji optycznej terenem o mało zróżnicowanym obrazie. Pewne problemy napotkano tu podczas wchodzenia w korkociąg, jednak gdy samolot już się znalazł w tej fazie lotu, opracowany w ramach tej pracy algorytm działał poprawnie w całym zakresie funkcjonalności. Z punktu widzenia celu pracy nie jest to ograniczenie opracowanego algorytmu, gdyż ma on za zadanie wykryć stan lotu określany jako korkociąg, a nie przewidywać możliwość jego zajścia. Zadanie identyfikacji korkociągu algorytm wykonywał prawidłowo podczas wszystkich przedstawionych badań.

Rozdział 7, zgodnie ze swoim tytułem „Podsumowanie”, zawiera zebranie wniosków dotyczących przeprowadzonych badań. Mają one uogólniony charakter i uwagi do nich znajdują się w omówieniu treści poszczególnych rozdziałów pracy, w których się pojawiają.

Ponadto Autor zaproponował kierunki przyszłych badań, związanych z tematyką rozprawy, a mianowicie opracowanie układu sterowania lotem samolotu nad terenami górzystymi, wykorzystującego jako dane wejściowe informacje z układu wizyjnego. Problemem badawczym byłoby tu określenie sposobu estymacji linii horyzontu, tworzonego przez elementy linii łamanej lub bardziej skomplikowanych struktur. Autor przewiduje także możliwość zastosowania innych metod przetwarzania obrazu do sterowania lotem samolotu w innych, niż przebadany korkociąg, fazach lotu.

Podsumowując pracę należy stwierdzić, że Autor zrealizował w całym zakresie założenia badawcze osiągając planowane cele naukowe. W sposób właściwy zaplanował i zrealizował badania eksperymentalne zaprojektowanego przez siebie systemu o nowatorskim charakterze, a następnie wykorzystywał uzyskane wyniki w

wykonanym przez siebie systemie zabudowanym na pokładzie rzeczywistego samolotu. Potrafił zaproponować skuteczne rozwiązania problemów pojawiających się podczas symulacji w środowisku wirtualnym, a wynikających z ograniczeń stosowanych metod i narzędzi. Stworzył nowe rozwiązanie układu sterowania lotem samolotu podczas wyprowadzania go z korkociągu w trybie automatycznym, tylko za pomocą informacji wizyjnych. Jest to niespotykane na rynku rozwiązanie, stanowiące o istotnej nowości ocenianej pracy.

W treści pracy pojawiają się liczne błędy redakcyjne, także błędy literowe i gramatyczne, niekiedy utrudniające zrozumienie myśli Autora. Jednak można stwierdzić, że choć w wielu miejscach zaburzają one zrozumienie toku myślenia Doktoranta, to nie umniejszają bardzo wysokiej oceny merytorycznej przedstawionej mi do oceny rozprawy doktorskiej. Oceniam jej poziom jako bardzo dobry i spełniający w całym zakresie wymagania stawiane przed rozprawami doktorskimi. Autor wykazał się umiejętnością formułowania celu naukowego badań oraz znajomością metodyki prowadzenia badań naukowych, popartą znajomością wiedzy w obszarach objętych przedstawioną rozprawą.

Wniosuję o dopuszczenie mgr inż. Piotra Szczerby do publicznej obrony przedstawionej mi pracy jako rozprawy doktorskiej.

Dr hab. inż. Cezary Szczepański
Profesor Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Lotnictwa