

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: System autonomicznego lądowania bezzałogowego statku powietrznego na podstawie danych wizyjnych
Autor rozprawy: mgr inż. Marcin Paszkuta
Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Konrad Wojciechowski
Dziedzina: nauki techniczne
Dyscyplina: informatyka techniczna i telekomunikacja

Niniejsza recenzja została przygotowana na zlecenie Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Polsko-Japońskiej Akademii Technik Komputerowych.

1. Cel i zakres rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Paszkuty dotyczy problematyki modelowania i symulacji bezzałogowych statków powietrznych (BSP), zastosowania metod uczenia do segmentacji semantycznej w kontekście detekcji miejsc bezpiecznych do lądowania oraz konwolucyjnych sieci do estymacji głębi w kontekście unikania kolizji w locie, jak również aspektów technicznych budowy oraz integracji prototypowego systemu wizyjnego z lekkim bezzałogowym statkiem powietrznym. Proponowane przez autora rozwiązanie realizuje dwa podstawowe z punktu widzenia bezpieczeństwa aspekty, a więc detekcję przeszkód terenowych w trakcie autonomicznego lotu oraz wybór odpowiedniego miejsca do lądowania w sytuacji awaryjnej - oba realizowane są na podstawie analizy obrazów pozyskanych przy użyciu zamontowanych na BSP kamer światła widzialnego. W pierwszej części rozprawy skupiono się na przedstawieniu podstaw teoretycznych modelowania BSP (głównie quadrotora) oraz rozwiązań stosowanych w tego typu systemach detekcji miejsc i unikania kolizji. W drugiej części przedstawiono budowę autorskiego prototypu systemu wizyjnego zamontowanego na opracowanym bezzałogowym statku powietrznym.

W rozprawie postawiono dwa główne cele badawcze:

1. Opracowanie skutecznej metody minimalizującej ryzyko podczas awaryjnego lądowania bezzałogowego statku powietrznego w nieznanymi warunkach terenowych poprzez wybór bezpiecznego miejsca lądowania na podstawie danych wizyjnych otrzymanych z zamontowanych na BSP kamer.
2. Implementację metody umożliwiającej detekcję przeszkód w trakcie autonomicznego lądowania, bazującej na analizie obrazu pochodzącego ze stereowizyjnego układu kamer i wykorzystaniu algorytmu wyszukiwania wolnej przestrzeni poprzez analizę mapę głębi zrekonstruowaną przy użyciu modelu HITNet.

Teza pracy brzmiała: „*Analiza obrazów z użyciem technik głębokiego uczenia przeprowadzona bezpośrednio na module obliczeniowym zintegrowanym z lekkim bezzałogowym statkiem powietrznym przy zastosowaniu odpowiednich metod treningu dla modeli sieci neuronowych realizujących zadanie: i) segmentacji semantycznej, ii) estymacji mapy dysparycji w obrazach stereo umożliwia wyznaczanie bezpiecznego obszaru lądowania oraz detekcję występujących na nim przeszkód*”.

Zakres przedstawionej rozprawy dotyczył:

- przygotowania dedykowanego środowiska symulacyjnego bazującego na najnowszej wersji silnika graficznego Unreal Engine 5, co pozwalało na odtworzenie zachowania BSP w wirtualnym środowisku z uwzględnieniem najważniejszych elementów wchodzących w skład prototypowego systemu wizyjnego, a jednocześnie taki cyfrowy bliźniak umieszczony w wirtualnej przestrzeni mógł posłużyć jako źródło danych wizyjnych oraz wygodne narzędzie dla przeprowadzenia testów integracyjnych,
- opracowania i implementacji metod detekcji przeszkód w trakcie autonomicznego lotu BSP na podstawie dwuwymiarowych obrazów ze stereoskopowej pary kamer zamontowanych w centropłacie równolegle do kierunku lotu oraz wybór odpowiedniego miejsca do lądowania z wykorzystaniem algorytmów analizy obrazu pozyskanego przy użyciu kamery skierowanej prostopadle do kierunku lotu,
- budowy prototypu czterowirnikowca wyposażonego w kontroler lotu bazujący na otwartym oprogramowaniu, co pozwoli na przetestowanie w warunkach rzeczywistych oraz na danych syntetycznych (symulowanych) kluczowych modułów systemu wizyjnego.

W pracy dominuje wątek teoretyczny związany z tematyką modelowania dynamiki lotu BSP (na przykładzie quadrotora), analizy danych wizyjnych obejmujący obszar symulacji komputerowej, a w szczególności możliwości użycia syntetycznych danych na etapie treningu oraz weryfikacji wykorzystanych modeli sieci. Oprócz aspektów teoretycznych rozprawa zawiera również element praktyczny dotyczący integracji proponowanego systemu z bezzałogowym statkiem powietrznym. Rozpatrywane problemy stanowią bez wątpienia istotne wyzwanie teoretyczne i metodologiczne.

2. Struktura i zawartość rozprawy

Recenzowana praca doktorska obejmuje formalnie 4 główne rozdziały, poprzedzone wstępem oraz zakończone podsumowaniem. Zasadnicza część rozprawy liczy łącznie 159 stron, w tym dorobek naukowy autora oraz bibliografię liczącą 70 pozycji.

Praca rozpoczyna się wstępem, w którym przedstawiono dwa główne cele badawcze, tezę pracy oraz nowatorskie elementy rozprawy.

W rozdziale drugim przypomniano teoretyczne podstawy modelowania i symulacji komputerowej w kontekście bezzałogowych statków powietrznych, głównie dotyczące symulacji dynamiki lotu na przykładzie implementacji modelu quadrotora. Omówiono również kwestie związane z symulacją dodatkowych podzespołów prototypu BSP, w tym kamer i sensorów używanych przez system wizyjny, z uwzględnieniem unikalnych cech użytego silnika graficznego Unreal Engine 5.1.

W kolejnym rozdziale skupiono się na zagadnieniach związanych z detekcją miejsc bezpiecznych do lądowania w nagłych sytuacjach awaryjnych, jak utrata łączności z operatorem, czy też nadmierne rozładowanie akumulatora zasilającego układy BSP. Głównym celem takiego podsystemu detekcji miejsc bezpiecznych do lądowania jest minimalizacja ryzyka podczas autonomicznego lądowania, co osiągnięto poprzez wykorzystanie systemu wizyjnego bazującego na analizie obrazu obszaru znajdującego się poniżej trasy przelotu drona. Zaprezentowana została też struktura użytej sieci neuronowej oraz hybrydowa metoda treningu z użyciem rzeczywistych i syntetycznych danych.

W rozdziale czwartym przedstawione zostały podstawy teoretyczne oraz możliwe implementacje kluczowych elementów wchodzących w skład podsystemu unikania kolizji, z wykorzystaniem stereoskopowego postrzegania głębi. Zaproponowany w rozprawie mechanizm postrzegania głębi bazuje na modelu konwolucyjnej sieci neuronowej, która to wyznacza mapę rozbieżności z par zarejestrowanych przez kamery obrazów stereo.

W ostatnim rozdziale opisano implementację proponowanych podsystemów unikania kolizji i autonomicznego lądowania w quadrotorze (dronie) wykonanym na potrzeby pracy. Oprócz opisu komponentów użytych do budowy BSP, przedstawiono uzasadnienie ich doboru pod kątem optymalizacji czasu lotu oraz spełnienia minimalnych wymagań dotyczących udźwigu drona. Omówiono też kwestie związane z doбором modułu obliczeniowego oraz integracją opracowanych podsystemów z kontrolerem lotu.

W podsumowaniu przypomniano cele pracy i jej tezę, sposoby rozwiązania postawionego problemu badawczego oraz autorskie elementy opracowane podczas realizacji niniejszej rozprawy.

3. Najważniejsze osiągnięcia rozprawy

Biorąc pod uwagę zawartość pracy oraz pozytywną ocenę jej zawartości merytorycznej, za główne osiągnięcia Autora należy uznać:

- wykorzystanie środowiska symulacyjnego bazującego na najnowszej wersji silnika gier Unreal Engine 5.1 dla odzwierciedlenia fizyki lotu bezzałogowego statku powietrznego typu quadrotor wraz z zestawem sensorów umożliwiających akwizycję wielomodalnych danych treningowych oraz testy opracowanego systemu wizyjnego w przestrzeni wirtualnej,
- opracowanie metody umożliwiającej tworzenie wielomodalnych adnotowanych zbiorów danych przeznaczonych do treningu głębokich sieci neuronowych realizujących zadanie segmentacji semantycznej z możliwością precyzyjnego przypisania poszczególnych pikseli do określonych klas, dodatkowo zoptymalizowaną pod kątem detekcji obszarów nadających się do lądowania,
- opracowanie wydajnej metody generowania stereowizyjnych par obrazów wraz z danymi referencyjnymi umożliwiającymi wyznaczenie wzorcowych map rozbieżności, przeznaczonych do efektywnego treningu konwolucyjnych sieci realizujących zadanie estymacji rozbieżności na potrzeby rekonstrukcji głębi,
- implementację elementów prototypowego systemu wizyjnego wspomagającego lądowanie w nieznanym terenie, zintegrowanego z lekkim bezzałogowym statkiem powietrznym typu quadrotor dla testów w rzeczywistym środowisku.

Należy zauważyć, że Autor podjął się realizacji bardzo ciekawego oraz istotnego z punktu widzenia praktycznych zastosowań tematu badawczego. Poszczególne wyniki badań Autora zostały opublikowane w kilkunastu pracach w języku angielskim, wśród których znajdują się wysoko punktowane czasopisma. Prowadzona aktywność publikacyjna oraz szeroki zakres tematycznych zagadnień w nich poruszanych świadczy bardzo pozytywnie o dużej wiedzy Autora rozprawy w zakresie poruszanej tematyki badawczej, popartej również doświadczeniem praktycznym.

4. Poprawność pracy i uwagi krytyczne

Poprawność treści rozprawy nie wzbudza zastrzeżeń, a stwierdzenia w niej zawarte wydają się być w pełni godne zaufania, co wynika w szczególności z przedstawionych podstaw teoretycznych popartych wynikami przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

Jednocześnie Autor nie ustrzegł się pewnych drobnych niedociągnięć, a wśród uwag o charakterze krytycznym, a po trosze i dyskusyjnym, można wymienić następujące zagadnienia:

1. W rozprawie przedstawiono (proponowane przez autora) dwa podsystemy wspomagające awaryjne lądowanie BSP w nieznanymi warunkach: wybór odpowiedniego miejsca do lądowania oraz wizyjną detekcję przeszkód w trakcie autonomicznego lotu. Nie zostały natomiast opisane szczegółowo pozostałe podsystemy i ich współdziałanie, np. moduł wyznaczania trajektorii lotu przy lądowaniu awaryjnym. Czy zatem nie lepsze byłoby uściślenie tematu rozprawy, np. na „*Elementy systemu autonomicznego lądowania...*”?

2. Prezentowane w rozdz. 3 zdjęcia terenu (np. rys. 3.7 czy 3.10) wykonane są ukośnie do powierzchni terenu, a nie prostopadle do niego, co powoduje zasłonięcie części terenu przez budynki czy drzewa. Jak to wpłynęło na wytrenowanie sieci neuronowej wykorzystywanej do detekcji miejsc do lądowania i skuteczność znajdowania optymalnego lądowiska?

3. Proponowany podsystem detekcji miejsc do lądowania wykorzystuje jedynie dane wizyjne. Czy zastosowanie współrzędnych geograficznych wcześniej przygotowanych punktów lądowania awaryjnego oraz odbiornika GPS do wyznaczenia aktualnej pozycji BSP (jako uzupełnienie systemu wizyjnego) usprawniłoby i przyspieszyło wyznaczenie optymalnego punktu lądowania?

4. W pracy nie zamieszczono wyników badań z działania proponowanych podsystemów w warunkach rzeczywistych, a w szczególności trajektorii lotu w trybie autonomicznego lądowania oraz omijania przeszkód przy podejściu do lądowania. Czy takie badania zostały przeprowadzone?

5. Ważniejsze uwagi szczegółowe

- str. 1, 2, 3, 5, 8, ... (i dalsze) – w wielu miejscach pracy występuje niewłaściwa interpunkcja,
- występujące w pracy usterki edytorskie, np. str. 3, w. 12 – jest „kompatybilne”, powinno być „kompatybilny”, str. 4, w. 2 – jest „realizowany”, powinno być „realizowana”, str. 45, pkt.3.1, w. 2 – jest „semantyczne”, powinno być „semantycznej” (i dalsze),
- str. 55 – na rys. 3.6 jest użyta zbyt mała czcionka, przez co tekst jest mało czytelny,
- w niektórych wzorach brak kropki lub przecinka na końcu (a w pozostałych są), np. (2.67), (2.69), (2.70), (2.71), (2.72-83), (3.2), (4.2), (4.3-5), (4.11), (4.19), (4.34) czy (4.39) i dalsze,
- czcionka użyta w opisach osi na rysunkach jest różnej wielkości (niektóre opisy są zbyt małe), np. rys.2.10 czy też porównanie rys. 4.19 z rys. 4.28 (dobrze byłoby to ujednolicić).

5. Podsumowanie

Przytoczone wyżej uwagi dyskusyjne nie umniejszają zasług Autora ani też nie kwestionują przedstawionych osiągnięć, a przedstawiona w pracy problematyka dotyczy aktualnych i interesujących zagadnień naukowych. Recenzowana praca zasługuje na wysoką ocenę merytoryczną i wnosi istotny oraz oryginalny wkład w dziedzinę informatyki. Postawione cele i zadania pracy zostały w pełni zrealizowane, a jej tematyka dobrze wpisuje się we współczesny nurt badań w tym zakresie.

Stwierdzam zatem z pełnym przekonaniem, że opiniowana rozprawa Pana mgr inż. Marcina Paszkuty pt. „*System autonomicznego lądowania bezzałogowego statku powietrznego na podstawie danych wizyjnych*” zawiera samodzielne rozwiązanie ważnego i istotnego problemu naukowego, jednocześnie spełniając wszystkie wymagania przewidziane dla rozpraw doktorskich w aktualnie obowiązującej Ustawie o Tytule Naukowym i Stopniach Naukowych. W związku z tym stawiam wniosek o dopuszczenie Autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Dr hab. inż. Zbigniew Świder