

dr hab. inż. Dominik Belter, prof. PP
Politechnika Poznańska
Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki

Poznań, 16 sierpnia 2024 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej magistra inżyniera Krzysztofa Andrzeja Gromady

pt.: „Zwiększenie autonomii taktycznych bezzałogowych statków powietrznych w oparciu o radar z syntetyczną aperturą i kamerę elektrooptyczną”

1 Podstawa wykonania recenzji

Niniejsza recenzja dotyczy rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Andrzeja Gromady zatytułowanej: „Zwiększenie autonomii taktycznych bezzałogowych statków powietrznych w oparciu o radar z syntetyczną aperturą i kamerę elektrooptyczną” w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika i technologie kosmiczne. Promotorem opiniowanej rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Jacek Misiurewicz, prof. PW, a promotorem pomocniczym dr hab. Barbara Siemiątkowska, prof. PW. Recenzja została przygotowana na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej nr 753/II/2024 z dnia 21.05.2024 r. Zgodnie z informacją dodatkową załączoną do powyższego pisma, postępowanie o nadanie stopnia naukowego doktora mgr. inż. Krzysztofa Andrzeja Gromady procedowane jest według wymagań określonych w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

2 Rozprawa doktorska

2.1 Struktura rozprawy

Rozprawa doktorska zredagowana jest w formie 7 rozdziałów i obejmuje 179 stron. Zestawienie literatury zawiera 193 pozycje, w tym 45 publikacji z ostatnich pięciu lat. Siedem pozycji literaturowych stanowi autorskie lub współautorskie prace Doktoranta.

Rozdział pierwszy wprowadza do tematyki rozprawy i przedstawia motywację podjęcia tematu autonomii bezzałogowych statków powietrznych. Następnie przedstawiony jest problem badawczy dotyczący autonomii UAV w sytuacji utraty łączności radiowej lub sygnału GNSS, teza rozprawy, nowatorskie rozwiązania w zakresie detekcji obiektów z użyciem danych z radaru, lokalizacji UAV, automatyzacji i adaptacji misji oraz streszczono zawartość pracy.

W rozdziale drugim przedstawiona została klasyfikacja współczesnych dronów z naciskiem na autonomię w systemach wojskowych. Opisane zostały poszczególne komponenty pokładowe UAV, w tym systemy komunikacji, sensory służące do lokalizacji, obserwacji, oraz komputery pokładowe. W rozdziale przedstawiona jest też platforma PGZ 19 „Orlik”, dla której projektowane zostały algorytmy przedstawione w rozprawie. Rozdział kończy się opisem systemów zwalczania UAV w celu podkreślenia znaczenia autonomii w tego typu systemach.

Rozdział trzeci poświęcony został przeglądowi literatury, opisowi systemów przygotowania misji oraz algorytmom detekcji obiektów w zobrazowaniu SAR (ang. Synthetic Aperture Radar). Podrozdziały w przeglądzie literatury powiązane są z systemami opracowanymi w ramach rozprawy. Dotyczą one między innymi uczenia sztucznych sieci neuronowych, przygotowania misji systemów UAV oraz lokalizacji dronów. Szczegółowo zostały opisane algorytmy pozwalające na automatyczne przeliczanie misji z uwzględnieniem ograniczeń bezpieczeństwa platformy. Więcej uwagi poświęcono przedstawieniu stanu wiedzy dotyczącego algorytmom lokalizacji z użyciem systemów wizyjnych oraz czujników typowych dla bezzałogowych platform powietrznych. Ze względu na zaproponowany w rozprawie sposób lokalizacji, szczegółowo opisano również algorytmy segmentacji obrazów z kamer oraz czujników SAR.

W rozdziale czwartym przedstawiona jest autorska metoda detekcji obiektów na obrazowaniu SAR. Wykorzystany został model YOLOv5 do wykrycia cieni i obszarów o wysokiej reflektywności, które dostarczają istotnych informacji do segmentacji obrazowania SAR. W rozdziale 4 przedstawiona została również metoda pretrenowania cech autoenkodera, która później może być wykorzystana do segmentacji, klasyfikacji lub detekcji obiektów. Metoda polega na filtrowaniu obrazu oczekiwanego na wyjściu sieci w celu minimalizacji wpływu szumów na funkcję kosztu.

Rozdział piąty odnosi się do zaproponowanej metody lokalizacji UAV bez sygnałów GNSS. Proponowany system wykorzystuje segmentację zobrazowania z radarów o syntetycznej aperturze. Wygenerowane maski segmentacyjne z bieżących danych sensorycznych, dopasowywane są do wcześniej wgranych map terenu. Przedstawione są dwie metody segmentacji zobrazowania SAR. Zaproponowana została również metoda dopasowania maski

do mapy. Pozwala ona na uwzględnienie różnych wag przy dopasowaniu różnych klas obiektów znajdujących się na obrazie segmentacji. Dużą uwagę poświęcono też analizie niepewności pomiarów poszczególnych sensorów. Przedstawiono wyniki zaproponowanych metod na satelitarnym zobrazowaniu SAR i uzyskano dokładność na poziomie 13 m.

Rozdział szósty poświęcony został systemowi automatycznego projektowania harmonogramu i trajektorii przelotu UAV z uwzględnieniem parametrów sensorów obserwacyjnych. Algorytm pozwala na planowanie realizowalnych geometrii nalotu na punkty podlegające obserwacji. Planer misji uwzględnia również unikanie obszarów zabronionych w celu zapewnienia bezpieczeństwa platformy UAV. Dużo uwagi w rozdziale poświęcono na wydajność proponowanych algorytmów, która jest wymagana do zaimplementowania opracowanych metod na komputerze pokładowym dronów.

Ostatni rozdział podsumowuje zawartość pracy, możliwości implementacyjne zwłaszcza w zakresie pracy w czasie rzeczywistym oraz przedstawia wnioski końcowe i kierunki dalszych prac.

2.2 Ogólna charakterystyka podjętej tematyki

Przedmiotem rozprawy jest kompletny system wsparcia autonomii bezzałogowych statków powietrznych. W rozprawie podkreślono znaczenie autonomii i bezpieczeństwa lotów UAV podczas zadań wykonywanych przez służby mundurowe w sytuacji utraty łączności z bazą i braku informacji o lokalizacji GNSS. W takiej sytuacji sterowanie pojazdem powinno odbywać się tylko na podstawie danych z czujników pokładowych. W rozprawie skupiono się na przetwarzaniu danych z radaru o syntetycznej aperturze oraz jednostkach inercyjnych do lokalizacji drona. Wykorzystano neuronowe i klasyczne metody przetwarzania obrazów do uzyskania segmentów reprezentujących typowe obiekty znajdujące się na ziemi podczas wykonywania misji. Uzyskana segmentacja została wykorzystana do opracowania systemu lokalizacji, który dopasowuje bieżące segmenty z mapą globalną. Dodatkowo do lokalizacji użyto również czujników inercyjnych. Praca porusza problem planowania misji bezzałogowych statków powietrznych. W pracy podjęto tematykę geometrycznego przeliczania ścieżki ruchu w celu unikania stref zagrożenia. Dużą wagę w pracy położono na konieczność uruchomienia opracowanych algorytmów na pokładzie bezzałogowego statku powietrznego.

2.3 Problem naukowy i teza rozprawy

Problem naukowy i tezy pracy zostały jednoznacznie zdefiniowane. Pierwszym problemem naukowym rozpatrywanym w rozprawie jest wykrywanie obszarów zainteresowania i obiektów charakterystycznych na zobrazowaniu SAR. Drugim problemem rozpatrywanym w rozprawie jest lokalizacja UAV na podstawie skanów SAR względem mapy. Kolejnym problemem rozwiązywanym w rozprawie jest uczenie sieci neuronowych z użyciem niewielkiej ilości danych. W ramach pracy podjęto tematykę związaną z rozwojem systemów automatycznego przygotowania i adaptacji misji w zakresie unikania obszarów potencjalnie niebezpiecznych.

W pracy została zdefiniowana następująca teza:

Analiza zobrazowania zbieranego przez radary z syntetyczną aperturą i kamery optyczne pozwala na podniesienie poziomu autonomii platform bezzałogowych oraz niezawodności i odporności na zakłócenia ich systemów nawigacji.

2.4 Rozwiązanie postawionego problemu

W celu udowodnienia tezy opracowany został nowy zbiór metod do detekcji obiektów zainteresowania na zobrazowaniu SAR, lokalizacji UAV na podstawie danych z sensorów obserwacyjnych oraz automatyzacji przygotowania i adaptacji misji. Wszystkie metody były opracowywane z uwzględnieniem ograniczeń zasobów obliczeniowych komputerów pokładowych bezzałogowych statków powietrznych i ograniczeń związanych z czasem przetwarzania. Następnie metody zostały zweryfikowane podczas wielu eksperymentów w celu przedstawienia ich skuteczności w zakresie zwiększania poziomu autonomii platform bezzałogowych.

2.5 Oryginalny dorobek autora i jego znaczenie poznawcze i aplikacyjne

Oryginalny dorobek Doktoranta związany jest z metodami wspierającymi autonomię bezzałogowych statków latających i można go zdefiniować następująco:

- opracowanie i implementacja metody detekcji obiektów zainteresowania na danych z sensorów SAR,
- opracowanie i implementacja algorytmu wstępnego wykrywania obiektów zainteresowania na zobrazowaniu SAR,
- opracowanie i implementacja algorytmu wstępnego trenowania sieci neuronowej w celu uzyskania sieci wykrywającej bardziej ogólne cechy i mającej większe zdolności generalizacyjne przy uczeniu na podstawie małej ilości danych,
- opracowanie i implementacja metody lokalizacji UAV z wykorzystaniem dopasowania obrazów segmentacji,
- opracowanie i implementacja metod wspierających automatyzację przygotowania i adaptacji misji,
- zaproponowanie sferoidalnych przestrzeni bezpiecznych oraz ograniczenie przedwczesnych wykryć potencjalnych kolizji,
- opracowanie i implementacja szeregu metod i algorytmów pozwalających na automatyzację budowy modelu do optymalizacji harmonogramu lotu z uwzględnieniem ograniczeń bezpieczeństwa,
- analiza wpływu niepewności danych sensorycznych na działanie całego systemu.

3 Uwagi merytoryczne

3.1 Silne i słabe strony pracy, uwagi dyskusyjne

- Niejasne jest, która metoda zaprezentowana w rozprawie jest określona w tym zdaniu: „W celu wydajnego post-processingu wprowadzono także nowatorski algorytm doprecyzowywania wstępnych estymacji położenia obiektów, uwzględniając ich pozycję kątową.”.
- Porównanie uproszczonych geometrii rzutowania obserwowanych obiektów dla SAI i EOIR na rysunku 2.2 jest niejasne. Który prostokąt reprezentuje powierzchnię terenu? Gdzie są umieszczone sensory? Gdzie jest oś normalna kamery? Czy szary prostopadłościan to obserwowany obiekt? Co oznaczają poszczególne płaszczyzny?
- We wstępie do rozdziału 3 jako przykład algorytmów fuzji danych z sensorów został wspomniany tylko filtr Kalmana. Warto wspomnieć też o innych metodach, np. grafowych lub filtrze cząsteczkowym.
- W rozdziale 3.2.2 wspomniane są metody wykrywania obiektów na zobrazowaniu SAR. Metody te wykorzystują klasyczne neuronowe detektory YOLO i SSD, które nie są najnowsze. Warto w tej sytuacji wspomnieć o nowszych metodach detekcji obiektów również aplikowanych w kontekście zobrazowania SAR.
- Sekcja „Visual Odometry” (VO) umieszczona na stronie 56 w większym stopniu odnosi się do metody Visual Inertial Odometry (VIO) niż do samego VO. Warto wprowadzić takie rozgraniczenie lub na początku wprowadzić VO, a później dodać opis integracji z danymi z jednostek inercyjnych.
- „Aktualnie największą popularnością cieszą się algorytmy SLAM oparte o teorię grafów. Są one wydajne obliczeniowo, osiągają najwyższe dokładności, a także umożliwiają zamykanie pętli.” - Warto wspomnieć dlaczego tak jest. Filtr Kalmana wykorzystuje tylko aktualny pomiar i poprzedni stan do obliczenia następnego stanu. W przypadku optymalizacji grafowej można użyć wielu wcześniejszych pomiarów jednocześnie.
- „Informacje nie są tracone dzięki rozszerzeniu przestrzeni barw do trzech zamiast pojedynczej” - to zdanie jest niejasne - przestrzeń barw jest zazwyczaj trójwymiarowa.
- Jak dokładnie działa blok „Wyszukiwanie minimum funkcji kosztu nałożenia” na schemacie blokowym 5.6? Czy to jest metoda minMaxLoc?
- Jak estymowane jest prawdopodobieństwo położenia UAV w wykrytych lokalizacjach pokazane na rys. 5.6? Czy ta procedura jest powiązana z obliczeniem „niepewności końcowej” przedstawionej w rozdziale 5.6?

- Silną stroną pracy jest analiza niepewności dla użytych sensorów. Warto jednak w tej sytuacji dodać wykresy, które pozwoliłyby przeanalizować niepewność w zależności od wybranych parametrów, np. pułapu lotu H.
- Do omijania obszarów zagrożenia wykorzystano algorytm Dijkstry. Dlaczego nie użyty został algorytm A*? Dobranie heurystyki nie jest bardzo trudnym zadaniem, a nawet nienajlepiej dobrana heurystyka poprawia czas wyszukiwania.
- W rozdziale 6.3.2 przedstawiono algorytm unikania kolizji. Warto wspomnieć wprost, jakie elementy proponowanej metody są nowe względem metody przedstawionej w pracy [80].
- Omówienie wyników na stronie 142: O ile został skrócony średni czas trwania manewrów względem oryginalnego algorytmu?

3.2 Ważniejsze uwagi redakcyjne

Praca jest praktycznie wolna od błędów językowych i pozbawiona usterek technicznych. Poniżej znajduje się kilka uwag redakcyjnych:

- Promień walca na rysunku 3.3 ma rozmiar 5 nm. Prawdopodobnie poprawna wartość to 5 metrów.
- „na, na przykład” na stronie 49
- str. 58: „doszło do zapętlenia trasy” - „doszło do zamknięcia pętli”
- str. 58: „komplikuje sam algorytm nakładania” - „dopasowania”
- str. 110: „niskiej rozdzielczości pikselu” - czy chodzi o wielkość obszaru odpowiadającego jednemu pikselowi?

4 Wnioski końcowe

Poniższe uwagi nie umniejszają wartości merytorycznej pracy. Przyjęte założenia są poprawne, a Doktorant skutecznie rozwiązał postawione problemy naukowe, wykorzystując odpowiednie metody. Praca świadczy o zaawansowanej wiedzy zarówno w podstawowych, jak i szczegółowych zagadnieniach z dziedziny nauk inżynierjno-technicznych, ze szczególnym uwzględnieniem autonomii bezzałogowych statków powietrznych. Rozprawa zawiera najnowsze osiągnięcia naukowe i odzwierciedla dobrą znajomość aktualnej literatury w dyscyplinie automatyki i robotyki, a analiza źródeł, w tym literatury światowej dotyczącej percepcji, lokalizacji i planowania misji UAV, została przeprowadzona prawidłowo. Mgr inż. Krzysztof Andrzej Gromada wykazał się umiejętnością poprawnego i przekonującego przedstawiania uzyskanych przez siebie wyników. Wyniki przedstawione są w sposób zwięzły i przejrzysty.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie aktualnego i ważnego problemu naukowego w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne oraz potwierdza wiedzę teoretyczną i umiejętność samodzielnego rozwiązywania problemów naukowych przez Doktoranta. Rozprawa w pełni spełnia ustawowe wymagania dotyczące rozpraw doktorskich określone w artykule 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

Wnioskuje do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie rozprawy mgr. inż. Krzysztofa Andrzeja Gromady do publicznej obrony.

Dominik Beltw