

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Gromady pt. Zwiększenie autonomii taktycznych bezzałogowych statków powietrznych w oparciu o radar z syntetyczną aperturą i kamerę elektrooptyczną

ppłk dr hab. inż. Radosław Przysowa

16 września 2024

1 Wprowadzenie

Rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Gromady poświęcona jest uzyskaniu możliwości autonomicznego lotu taktycznych bezzałogowców klasy MALE przy braku sygnałów nawigacyjnych. Do rozwiązania tego ambitnego zadania wykorzystano przetwarzanie obrazów z radaru o syntetycznej aperturze (SAR) i kamer wizyjnych metodami wizji komputerowej. Rozprawa ma dużą wartość naukową, gdyż prezentuje oryginalną metodę lokalizacji platformy opartą na dopasowywaniu wyników segmentacji obrazu do mapy terenu. Do detekcji obiektów wykorzystano zarówno klasyczne algorytmy przetwarzania obrazu, jak i zaawansowane techniki sztucznej inteligencji. Rozwiązanie ma również dużą wartość praktyczną, ponieważ jego wdrożenie pozwoli na wykonywanie misji taktycznych bezzałogowców, takich jak PGZ 19 Orlik, nawet gdy sygnały nawigacyjne satelitarne będą niedostępne. Tematyka badań dobrze się wpisuje w panujące w lotnictwie trendy do zwiększenia autonomii platform bezzałogowych. Rozprawa zawiera wyniki współpracy autora z Politechniką Warszawską i firmą PIT-RADWAR. Wyniki badań były w znacznej części publikowane jako oryginalne artykuły badawcze w recenzowanych czasopismach o wysokim rankingu. Potwierdza to, że poziom badań rozprawy wykracza poza stan wiedzy.

2 Treść rozprawy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska jest napisana w języku polskim, ma 179 stron i składa się z siedmiu rozdziałów. Zawiera również spis treści, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz spisy tabel, rysunków i skrótów. Literatura obejmuje 193 pozycje. Rozprawę zredagowano w dobrym stylu, zgodnie z zasadami redakcyjnymi przyjętymi dla tekstów naukowych w języku polskim. Ilustracje, tabele i wzory są czytelne, dobrze wykonane i są do nich odpowiednie odwołania. Rozdziały zawierają syntetyczne podsumowania, przydatne w studiowaniu dzieła.

Rozdział 1 (Wstęp) zawiera genezę projektu, motywację badań i tezę rozprawy, a także cele szczegółowe i streszczenie rozdziałów. Rozdział 2 (Współczesne drony i architektura systemów pokładowych) jest wprowadzeniem w problematykę systemów bezzałogowych, opartym o materiały własne autora i literaturę. Rozdział 3 (Nowoczesne algorytmy autonomii UAV) to przegląd literatury na temat metod nawigacji, sterowania i analizy obrazu wykorzystywanych do prowadzenia lotu autonomicznego. Rozdział 4 (Detekcja obiektów zagrożenia) przedstawia zagadnienia podstawowe i wyniki własne w obszarze detekcji obiektów z wykorzystaniem obrazów SAR i metod sztucznej inteligencji. W rozdziale 5 (Lokalizacja bez sygnałów GNSS) zaprezentowano autorski system lokalizacji oparty o segmentację obrazów SAR lub kamer wizyjnych. W rozdziale

6 (Adaptacyjność platformy) zaprezentowano studium działania całego systemu w zakresie realizacji misji i autonomicznej nawigacji. W rozdziale 7 zawarto podsumowanie, wnioski i propozycje dalszych badań.

Objętość rozprawy jest odpowiednia, zapewniająca udokumentowanie rozwiązania problemu naukowego w zwięzłej formie. Tekst jest na ogół zrozumiały, logiczny i dobrze zorganizowany.

3 Ocena merytoryczna

Cel i teza pracy, są dobrze umotywowane i jasno sformułowane we wstępie rozprawy. Autor wykonał złożone zadanie autonomicznego sterowania samolotem bezzałogowym uzyskując następujące cele szczegółowe:

1. detekcji obiektów zainteresowania/zagrożenia,
2. określenia lokalizacji samolotu na podstawie danych z sensorów obserwacyjnych,
3. automatyzacji przygotowania i prowadzenia misji przez wskazane punkty.

Opracowano nowe metody detekcji obiektów na obrazach radarowych z wykorzystaniem zarówno klasycznych algorytmów przetwarzania obrazu, jak i technik sztucznej inteligencji. Dzięki przyjętemu podejściu udało się zwiększyć zarówno szybkość, jak i dokładność detekcji. Zaproponowano również nowatorską metodę lokalizacji samolotu opartą na dopasowywaniu obrazów z sensorów do map cyfrowych. Metoda ta jest odporna na zmieniające się warunki atmosferyczne i oświetleniowe. Opracowano algorytm unikania kolizji, który pozwala na bezpieczne manewrowanie w złożonym środowisku. Zaprojektowano również system automatycznego planowania misji, który umożliwi tworzenie optymalnych tras lotu z uwzględnieniem różnych ograniczeń i warunków.

Praca oparta jest na solidnych podstawach teoretycznych z zakresu przetwarzania obrazu, sztucznej inteligencji i automatyki. Mimo, że zastosowane narzędzia przetwarzania obrazu tj. aukoenkoder i system YOLO są obecnie rutynowo stosowane w zadaniach wykrywania obiektów, zostały one zaimplementowane i zweryfikowane w rozprawie w sposób twórczy, potwierdzający biegłość autora w dziedzinie wizji komputerowej i głębokiego uczenia. Podjęte w pracy decyzje związane z wyborem modeli sztucznej inteligencji i narzędzi analizy obrazu są racjonalne i poddane walidacji. W wyniku segmentacji obrazów generowane są maski, które są następnie lokalizowane na uprzednio wgranych mapach terenu, co pozwala na ustalenie położenia samolotu. Określana jest jakość dopasowania maski z mapą, uwzględniająca niepewność segmentacji. Zaproponowany system lokalizacji jest podbudowany teoretycznie i zweryfikowane danymi z satelitarnych sensorów SAR.

Rozdziały 1-3 wprowadzają w zagadnienia rozprawy i są napisane w sposób przystępny, zrozumiały dla szerokiego grona odbiorców. Kolejne rozdziały zawierają rozwiązanie i wyniki badań, a więc wymagają od czytelnika skupienia i lepszego przygotowania. Ze względu na konieczność ograniczania objętości rozprawy, autor nie mógł w niej w pełni wytłumaczyć niektórych zagadnień i udokumentować wszystkich działań tego obszernego projektu. Na przykład w żaden sposób nie wprowadzono algorytmu FLD, ani nie rozwinięto tego akronimu. Mimo tych niedogodności, całość rozprawy pozostaje spójna i inspirująca, a jej studiowanie ułatwiają czytelne schematy blokowe i streszczenia rozdziałów. Zainteresowani szczegółami mogą sięgnąć do publikacji autora i cytowanej literatury.

Rozdział 2 opisuje stan techniki w obszarze dronów taktycznych i ich sensorów. Rozdział 3 omawia w zagadnienia autonomii platform bezzałogowych, wykrywania obiektów i odometrii. Dzięki powszechności stosowania w technice metod uczenia głębokiego i licznym publikacjom na ten temat, doktorant twórczo wykorzystał w pracy doświadczenia zebrane przez innych badaczy. Rozpoznawanie obrazów w paśmie widzialnym i podczerwieni za pomocą sieci neuronowych jest często stosowane, ale segmentacja zobrażeń radarowych nie jest tak powszechna. Obszerny przegląd literatury zawarty w rozprawie, odwołujący się do licznych prac z całego świata, należy zaliczyć do osiągnięć autora, bo potwierdza ważną umiejętność pracy ze źródłami.

O ile w rozdziale 4 przedstawione jest przyjęte podejście przetwarzania obrazów, opierające się na znanych metodach wizji komputerowej, to rozdział 5 prezentuje oryginalne i dojrzałe rozwiązanie problemu lokalizacji,

oparte o segmentację zobrazowania radarów o syntetycznej aperturze. Przyjęte metody przetwarzania obrazów i dopasowania maski do mapy terenu doprowadziły do uzyskania wiarygodnego rozwiązania, ale również potwierdziły biegłość autora w stosowaniu narzędzi wizji komputerowej.

Ważną częścią rozwiązania jest przedstawiona w rozdziale 6 koncepcję architektury komputera misji, w którym mają być implementowane procedury przygotowania misji, planowania trajektorii, unikania kolizji i określania warunków nalotu na punkty obserwacyjne. Oprócz zapewnienia autonomii, wymienione algorytmy przyczyniają się do zwiększenia bezpieczeństwa lotów. Prezentowane w rozprawie rozwiązanie problemu autonomii samolotu należy uznać za oryginalne osiągnięcie naukowe ze względu na jego złożoność i nowatorskie podejście.

Wyniki badań własnych przedstawione w rozdziałach 5 i 6 są na wysokim poziomie merytorycznym i dobrze udokumentowane. Należy pochwalić przeprowadzone analizy błędu dopasowania, czasu obliczeń i zapotrzebowania na moc obliczeniową. Co więcej, czas przetwarzania i dokładność lokalizacji porównano z innymi metodami i publikacjami. Są to czynniki decydujące o możliwości implementacji metody w rzeczywistym komputerze misji.

Rozprawa od strony redakcyjnej opracowana jest starannie. Autor podjął się niełatwego zadania opisanie zagadnień, które nie mają ugruntowanej terminologii w języku polskim. Niektóre terminy pozostawiono w oryginale np. visual odometry. Nie obyło się bez kalek językowych z angielskiego, ale generalnie praca napisana jest w dobrym stylu. Poziom tekstu nie odbiega od innych publikacji technicznych z tego obszaru, napisanych w języku polskim. Ortografia i interpunkcja jest poprawna, ale sporadycznie zdarzają się drobne błędy językowe, takie jak literówki. Jest ich dosłownie kilka w całej książce, więc nie utrudniają odbioru dzieła. Pozycje literatury są liczne, aktualne, dobrze dobrane i właściwie cytowane. Szkoda, że w małym stopniu uwzględniony został dorobek polskich autorów.

Praca jest bogato ilustrowana. Zawiera wiele schematów blokowych i rysunków, które dobrze tłumaczą realizowane działania i trudne pojęcia. Prezentowane grafiki na ogół są dobrej jakości i mają czytelne opisy. Niektóre wykresy nie mają podpisanych osi, np. na rys. 4.11 nie napisano, co przedstawiono na osi x. Wiele ilustracji pochodzi z innych publikacji (własnych i cudzych), co zostało prawidłowo odnotowane. Niestety reprodukowane rysunki zawierają opisy w języku angielskim, które nie zostały przetłumaczone. Jest to dopuszczalne w wewnętrznym opracowaniu naukowym, ale rzuca się w oczy. Tabele i wzory są wykonane starannie, zgodnie z zasadami redaktorskimi. Podsumowując, należy wysoko ocenić zarówno wykonane badania jak i dokumentującą je rozprawę. Zalety pracy zdecydowanie przeważają nad drobnymi niedociągnięciami.

4 Uwagi i pytania

1. Czy istnieją jakieś reguły decydujące, która z wspomnianych metod segmentacji (Hough lub histogramy) jest stosowana dla danego typu obszaru (s. 73)?
2. Czy standardowa konfiguracja i architektura modelu YOLOv5 była jakoś modyfikowana?
3. Proszę o rozbudowanie analizy rys. 4.11 (s. 82), a w szczególności wyjaśnieniu roli cieni w detekcji.
4. W tab. 4.1 i 4.2 przedstawiono porównanie czasu detekcji metod klasycznych i YOLOv5. Czy dokładność klasyfikacji w przedstawionych przypadkach była zbliżona.
5. Czy rozważane były inne sposoby uniknięcia przetrenowania poza redukcją szumów filtrem Gaussa/medianowym, przedstawioną w podrozdziale 4.6.3 ?
6. Jaka jest wymagana dokładność lokalizacji wspomniana na rys. 5.6. Jaka może być wartość błędu wyznaczania lokalizacji (podrozdział 5.6) dopuszczalna przez system sterowania samolotu i jakie może być działanie systemu w momencie jej przekroczenia?

5 Podsumowanie

W rozprawie doktorskiej przedstawiono oryginalne rozwiązanie prawidłowo zdefiniowanego problemu badawczego polegającego na zwiększeniu autonomii samolotu. Głównym osiągnięciem pracy jest zaprojektowanie, implementacja i walidacja złożonej procedury określenia lokalizacji samolotu na podstawie danych z sensorów obserwacyjnych. Rozprawa prezentuje szereg oryginalnych rozwiązań, które mogą przyczynić się do rozwoju technologii bezzałogowych systemów powietrznych. Najważniejszymi dokonaniem doktoranta było:

- Kompleksowe podejście do problemu autonomii platformy, od przetwarzania obrazu po planowanie misji.
- Wykorzystanie zobrazowań SAR do lokalizacji samolotu w każdych warunkach.
- Zwiększenie skuteczności wykrywania obiektów dzięki zastosowaniu adaptacyjnej analizy jasności pikseli oraz wprowadzeniu dodatkowych informacji kontekstowych.
- Ustalenie lokalizacji i jej niepewności na podstawie dopasowania masek do map terenu, przy niskim czasie przetwarzania rzędu 50 ms.
- Koncepcja implementacji opracowanych algorytmów w komputerze misji, z uwzględnieniem jego ograniczonych zasobów sprzętowych.

Przyjęty przedmiot i cel rozprawy sprawiają, że jej zakwalifikowanie do dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne nie budzi wątpliwości. Zawartość rozprawy potwierdza wysoki poziom ogólnej wiedzy teoretycznej kandydata w tej dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Analizowany problem jest złożony i interdyscyplinarny, więc uzyskanie poprawnego rozwiązania świadczy o dobrym przygotowaniu i dojrzałości badawczej Doktoranta.

Uważam, że recenzowana rozprawa doktorska mgra Krzysztofa Gromady stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, spełniając z wyraźnym nadmiarem wymagania wynikające z Ustawy z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668 z późn. zm). W związku z tym stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony. Ze względu na kompleksowe podejście do problemu autonomii platformy, duży zakres i wysoki poziom wykonanych prac oraz użyteczne znaczenie wyników badań wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.

Warszawa, 16 września 2024