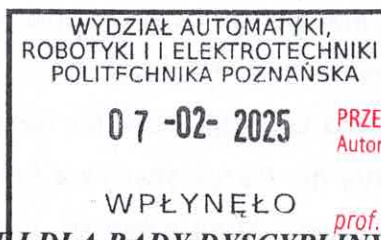


Prof. dr hab. inż. Adam Kawalec
Instytut Techniki Rakietowej i Mechatroniki
Wydział Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa
Wojskowa Akademia Techniczna

Warszawa, dnia 30.01.2025 r.



PRZEWODNICZĄCY RADY DISCYPLINY
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne
prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY DISCYPLINY
AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA I TECHNOLOGIE
KOSMICZNE
POLITECHNIKI POZNAŃSKIEJ**

Tytuł rozprawy: „*Vision inspection using artificial intelligence to improve safety of aerodrome*”

Autor: mgr inż. Jakub Suder

Promotor: prof. dr hab. inż. Adam Dąbrowski

Podstawa sporządzenia recenzji rozprawy doktorskiej: pismo DR-012/132/2024 przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej prof. dr. hab. inż. Wojciecha Szelaąga z dnia 28.11.2024 z prośbą o sporządzenie recenzji zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej z dnia 19 listopada 2024r.

1. Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrzone w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?

Rozprawa doktorska dotyczy zastosowania przez Doktoranta systemu sztucznej inteligencji w inspekcji wizyjnej na terenie obszarów manewrowych portów lotniczych, w szczególności płaszczyzn lotniskowych (*ang. Aerodrome*) czyli pasów startowych, dróg kołowania oraz miejsc postojowych statków powietrznych. Kontrola tych obiektów jest bardzo istotna z punktu widzenia bezpieczeństwa wykonywanych operacji lotniczych. Genezą zainteresowania Doktoranta tą problematyką była możliwość wykonywania stosownych badań, szczególnie w zakresie zdolności operacyjnej portu lotniczego w warunkach obniżonej widzialności. Wymagało to rozwiązania istotnych

zagadnień w zakresie inspekcji wizyjnej z wykorzystaniem rozwiązań bazujących na sztucznej inteligencji, czyli uczeniu maszynowym, głębokich sieciach neuronowych oraz algorytmach decyzyjnych.

Problematyka ta wynika również bezpośrednio ze standardów i zaleceń Agencji Unii Europejskiej ds. Bezpieczeństwa Lotniczego (*ang. European Union Aviation Safety Agency - EASA*), która sugeruje wykorzystanie rozwiązań sztucznej inteligencji dla inspekcji obszarów manewrowych w portach lotniczych.

Do zasadniczych problemów badawczych dla potrzeb realizacji rozprawy należy zaliczyć: wykrywanie niebezpiecznych obiektów typu FOD (*ang. Foreign Object Debris*) na obszarach portu lotniczego, wykrywanie poziomych oznaczeń lotniskowych oraz klasyfikację lamp zagłębionych oświetlenia nawigacyjnego w płaszczyznie lotniskowe.

Bazując na aktualnych doniesieniach literaturowych w zakresie tematu rozprawy oraz własnych doświadczeniach badawczych Doktorant podjął badania w zakresie wykorzystania algorytmów sztucznej inteligencji dla inspekcji obszarów manewrowych na terenie portu lotniczego.

Rozwiązanie problemów badawczych podjętych przez Autora rozprawy jest szczególnie ważne dla poprawy bezpieczeństwa na terenie obszarów manewrowych w portach lotniczych w zakresie wykonywanych operacji lotniczych.

Z analizy stanu wiedzy literaturowej, w szczególności wymagań Agencji Unii Europejskiej ds. Bezpieczeństwa Lotniczego wynika cel rozprawy dotyczący kontroli wizyjnej z wykorzystaniem sztucznej inteligencji w celu poprawy bezpieczeństwa na terenie lotniska.

Cel rozprawy jest określony właściwie, tematyka jest aktualna i potrzebna. Recenzowana rozprawa ma charakter teoretyczno-eksperymentalny.

Doktorant sformułował następującą tezę rozprawy:

„Zmodyfikowane metody przetwarzania obrazu wraz z rozwiązaniami bazującymi na sieciach neuronowych w obszarze systemów wbudowanych znacząco usprawniają i ułatwiają zautomatyzowany proces inspekcji portu lotniczego”

oraz przedstawił zadania cząstkowe wynikające z celu rozprawy i weryfikacji powyższej tezy. Realizacja badań naukowych zawartych w rozprawie była możliwa dzięki współpracy naukowej Zakładu Układów Elektronicznych i Przetwarzania Sygnałów Politechniki Poznańskiej z portem Lotniczym Poznań–Ławica.

Rozprawa składa się z sześciu rozdziałów oraz biografii, jest bardzo obszerna. Zawiera również wykaz rysunków i tabel. Rozdział 1. rozprawy jest wprowadzeniem w tematykę badań ze szczegółowym opisem dokumentów EASA oraz wykazu naukowych projektów badawczych prowadzonych w ramach pracy nad rozprawą doktorską. Doktorant przedstawił również potencjalne zastosowanie algorytmów opracowanych w niniejszej pracy doktorskiej. Dzięki wykorzystaniu platformy pomiarowej możliwa była inspekcja lamp nawigacyjnych lotniskowych, a także możliwość wykrycia niebezpiecznych obiektów typu FOD na lotnisku podczas ruchu pojazdu. Rozdział ten zawiera również tezę rozprawy, jej cel i zakres badań. Autor rozprawy przedstawił również listę własnych i współautorskich publikacji w wysoko punktowanych czasopismach i materiałach konferencyjnych (czternaście pozycji, w tym dwie samodzielne publikacje) oraz osiem publikacji nie związanych bezpośrednio z tematem rozprawy doktorskiej. Autor w rozdziale 2. obszernie opisał stan wiedzy i stosowane rozwiązania w zakresie tematyki rozprawy. Doktorant omówił główne zagadnienia rozprawy oraz obowiązujące normy i przepisy powiązane bezpośrednio z tematyką rozprawy. Przedstawił szczegółowo metody przetwarzania obrazu, z wykorzystaniem metod klasycznych, jak również wykorzystujących sieci neuronowe i uczenie maszynowe oraz opisał zagadnienia z zakresu fotometrii i radiometrii. Istotnym elementem tego rozdziału jest również analiza jakości kamer oraz metody oceny proponowanych algorytmów.

W rozdziale 3. Doktorant przedstawił własną propozycję systemu wykrywania niebezpiecznych obiektów typu FOD na lotnisku wraz z praktyczną implementacją koncepcji tego systemu wykorzystanego do badań eksperymentalnych na terenie portu Poznań-Ławica. Szczególną uwagę zwrócił na wyniki uzyskane przy użyciu klasycznych metod przetwarzania obrazów (rozd. 3.3) w porównaniu z metodami zaawansowanymi wykorzystującymi konwolucyjne sieci neuronowe (rozd. 3.4). Autor przeanalizował możliwość wykorzystania modeli GoogLeNet zaimplementowanych w środowiskach MATLAB i YOLOv5 przy użyciu Google Colab.

Rozdział 4. dotyczy wykrywania poziomych oznakowań lotniskowych tzn. pasów startowych, dróg kołowania oraz innych powierzchni lotniska. Wynikiem badań było opracowanie unikalnego zbioru danych *PLAVS1* składającego się z obszernych nagrań dotyczących obszarów o ograniczonym dostępie. Doktorant opisał proponowane rozwiązania wykrywania poziomych oznakowań lotniskowych oraz

wyniki badań eksperymentalnych. Przedstawił również możliwość implementacji wybranych algorytmów na komputerach jednopłytkowych.

W rozdziale 5. Doktorant przedstawił klasyfikację jakościową oświetlenia naziemnego lotniska, w tym klasyfikację wizyjną systemu oświetlenia nawigacyjnego lotniska i koncepcję oceny zużycia lamp na podstawie zniszczenia i zmatowienia pryzmatów zainstalowanych w lampach. Doktorant przedstawił autorski, obszerny zbiór danych *PLAVS2*, składający się z ponad 1000 zdjęć lamp systemu oświetlenia lotniska o różnym stopniu zużycia, algorytm wykrywania lamp i określania ich orientacji, a następnie klasyfikację pryzmatu z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. Autor wykonał analizę doboru sieci neuronowych i możliwości ich wykorzystania w proponowanym systemie. Dodatkowo przedstawił klasyfikację lamp na podstawie koloru emitowanego przez nie światła oraz koncepcję systemu wykorzystanego do kontroli chromatyczności światła nawigacyjnego zgodnie z obowiązującymi normami. Wnioski końcowe z wykonanych badań oraz podsumowanie rozprawy Doktorant przedstawił w rozdziale 6. rozprawy.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?

W przedstawionej do recenzji rozprawie Doktorant uwzględnił 196 pozycji literaturowych, których w 17. jest współautorem, a w 9. jest pierwszym autorem. Literatura przedmiotu, zawiera pozycje książkowe, konferencyjne oraz publikacje istotnych, czołowych pism światowych. Bazując na dostępnych pracach Autor przedstawił stan wiedzy w zakresie tematyki rozprawy. Dokonał wnikliwej analizy źródeł literaturowych z obszaru inspekcji wizyjnej z wykorzystaniem sztucznej inteligencji w celu poprawy bezpieczeństwa portów lotniczych, co z odpowiednim wnioskowaniem pozwoliło na sformułowanie celu pracy oraz szczegółowych zadań badawczych. Sposób przeprowadzenia analizy źródeł odpowiada potrzebom rozprawy i należy uznać go za właściwy i szczegółowy. Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością problematyki związanej z tematyką rozprawy. Autor przedstawił w rozprawie znane rozwiązania w zakresie wykorzystania podzespołów stosowanych w systemach inspekcji wizyjnej oraz rozwiązania autorskie włącznie z propozycją autorskiego systemu inspekcji wizyjnej z wykorzystaniem sztucznej inteligencji.

Opracowany system wykorzystuje rozwiązania z obszaru przetwarzania obrazów i sztucznej inteligencji.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Głównymi zagadnieniami badawczymi analizowanymi w rozprawie są: wykrywanie niebezpiecznych obiektów typu FOD w istotnych obszarach portu lotniczego, wykrywanie poziomych oznaczeń lotniskowych oraz klasyfikacja lamp oświetlenia nawigacyjnego umieszczonych w płaszczyznach lotniskowych, które bezpośrednio dotyczą inspekcji wizyjnej z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji w celu poprawy bezpieczeństwa portów lotniczych. Przyjęte założenia w wymienionych obszarach badawczych są bardzo istotne, ponieważ obiekty typu FOD mogą być przyczyną katastrofy lotniczej, szczególnie podczas startu i lądowania statku powietrznego, poziome oznaczenia lotniskowe wpływają na zdolność operacyjną portu lotniczego w warunkach obniżonej widzialności, a ocena chromatyczności barwy światła emitowanej przez lampy oświetlenia nawigacyjnego jest niezbędna w związku z obowiązującymi przepisami i normami międzynarodowymi. Wynikiem badań przeprowadzonych przez Doktoranta jest: autorska baza danych *PUT dataset* rzeczywistych obiektów zidentyfikowanych na lotnisku Poznań-Ławica oraz wykorzystanie algorytmów przetwarzania obrazu do wykrywania takich obiektów typu FOD na płaszczyznach lotniskowych, przy zastosowaniu stosownych architektur sieci neuronowych i metod przetwarzania obrazu; autorska baza danych nagrań wideo *PLAVS1* z zastrzeżonego terenu portu lotniczego i opracowanie algorytmów wykrywania linii, bazujące na metodach przetwarzania obrazu w przypadku poziomych oznaczeń lotniskowych oraz autorska baza danych *PLAVS2*, w których dobrano odpowiednie algorytmy w oparciu o metody przetwarzania obrazu dla klasyfikacji lamp oświetlenia nawigacyjnego umieszczonych w płaszczyźnie lotniskowej.

Autor opracował i zrealizował fizycznie platformę pomiarową niezbędną do przeprowadzenia eksperymentów, co należy uznać za wartość dodaną rozprawy. Istotną zaletą proponowanych rozwiązań jest również uniwersalność systemów i możliwość wykonywania wielu inspekcji przy użyciu jednego pojazdu i jednej kamery. Przykładowo możliwe jest wykrywanie oznaczeń poziomych na lotniskach przy

równoczesnym wykrywaniu obiektów FOD. Ponadto proponowane rozwiązania nie są przeznaczone do konkretnego typu pojazdu, dzięki czemu możliwe jest łatwe zdemontowanie kamery i systemu przetwarzania danych.

Należy podkreślić, że Autor przedstawił oryginalne rozwiązania w zakresie inspekcji wizyjnej wykorzystującej metody sztucznej inteligencji w celu zwiększenia bezpieczeństwa lotniska.

Uzyskane wyniki pomiarów wskazują, że opracowane systemy są przydatne w różnych pojazdach obsługi lotniska i platformach pomiarowych, wspierając w ten sposób inspekcję i zarządzanie bezpieczeństwem operacji lotniskowych, co również potwierdza tezę rozprawy doktorskiej.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Praca stanowi oryginalny wkład Autora do problematyki wykorzystania metod sztucznej inteligencji dla inspekcji wizyjnej w celu poprawy bezpieczeństwa portów lotniczych. Do zasadniczych, oryginalnych osiągnięć Autora należy zaliczyć:

- W zakresie detekcji niebezpiecznych obiektów typu FOD, opracowanie nowego zestawu danych obrazowych zgodnie z przepisami FAA (*ang. Federal Aviation Administration*) oraz precyzyjny wybór efektywnej architektury sieci neuronowej do wykrywania obiektów typu FOD;
- W zakresie wykrywania i oceny poziomych oznaczeń lotniska, opracowanie nowego zestawu danych wideo nagranych w strefie zastrzeżonej lotniska, opracowanie algorytmu wykrywania linii przy użyciu segmentacji obrazu opartej na kolorze w przestrzeni kolorów HSV (*ang. Hue, Saturation, Value*), porównanie wymagań dotyczących zasilania podczas przetwarzania sekwencji wideo w systemach wbudowanych w czasie rzeczywistym oraz analiza efektywności energetycznej i DVFS (*ang. Dynamic frequency scaling*);
- W zakresie klasyfikacji jakości oświetlenia naziemnego lotniska, opracowanie nowego zestawu danych obrazowych z ponad 540 lampami i pryzmatami, opracowanie koncepcji procesu wykrywania lamp i pryzmatów, wybór sieci neuronowej do klasyfikacji jakości pryzmatów, co potwierdziło w całości tezę rozprawy.

Opracowana przez Autora oryginalna architektura systemu sztucznej inteligencji i przeprowadzone badania eksperymentalne mogą zostać wykorzystane przede wszystkim w obszarze zdefiniowanych w rozprawie przez Doktoranta obszarach, gdzie istotnym jest problem zapewnienia bezpieczeństwa portów lotniczych. Uzyskane rozwiązania nie są dotąd znane w literaturze przedmiotu. Dodatkowo interpretacja zamieszczonych w rozprawie wyników zaproponowanych przez Doktoranta badań eksperymentalnych zasługuje na podkreślenie.

Rozprawa zawiera również wykaz dorobku naukowego Doktoranta powiązanego z tematem rozprawy (rozdz. 1.3) recenzowanych publikacji naukowych, które zostały opublikowane w trakcie realizacji rozprawy doktorskiej, co jest dodatkową oceną jego wyników badań na arenie międzynarodowej i świadczy o znaczącym wkładzie Autora do uprawianej przez niego tematyki badawczej.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Rozprawa jest bardzo obszerna, zawiera 218 stron i jest zredagowana w sposób bardzo staranny, napisana jasnym językiem i posiada logiczny układ. Szata graficzna przy prezentacji uzyskanych rezultatów jest przejrzysta i logiczna. Wyniki analiz przedstawione zostały w rozprawie w sposób jasny i zwięzły. Sposób interpretacji otrzymanych wyników badań jest również klarowny i wyczerpujący.

W rozprawie nie znalazłem zasadniczych błędów edycyjnych.

Jednak na str.104 wzór (45) - użycie oznaczenia (*) jest nieuprawnione w przypadku mnożenia algebraicznego, ponieważ stosowane jest zwykle dla wyznaczania operacji splotu. Należy przyjąć, że brak w rozprawie odnośników literaturowych do wyrażeń matematycznych, oznacza oryginalność tych wzorów.

Uwagi te nie obniżają wartości rozprawy i trudno doszukiwać się słabych stron rozprawy. Przedstawiona do recenzji rozprawa stanowi nowatorskie, szerokie i wnikliwe opracowanie potwierdzone precyzyjnie zaplanowanymi badaniami.

6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżynieryjno-technicznych?

Autor opracował nowy, oryginalny system inspekcji wizyjnej zastosowany do wykrywania niebezpiecznych obiektów typu FOD, wykrywania poziomych oznaczeń lotniskowych oraz klasyfikacji lamp oświetlenia nawigacyjnego zagłębionych w płaszczyzny lotniskowe wraz z praktyczną implementacją koncepcji systemu pomiarowego wykorzystanego do badań eksperymentalnych na terenie portu lotniczego Poznań–Ławica. System ten jest bardzo istotny z powodu poprawy bezpieczeństwa na terenie portu lotniczego oraz znacznie wpływający na poprawę detekcji np. obiektów typu FOD poprzez wykorzystanie konwolucyjnych sieci neuronowych (rozdz. 3.4), metodę poprawy detekcji poziomych oznakowań lotniskowych (rozdz. 4.2.2) wraz z testami eksperymentalnymi algorytmów (rozdz. 4.3) oraz klasyfikację lamp zagłębionych oświetlenia nawigacyjnego w płaszczyzny lotniskowe, w szczególności zaproponowany przez Doktoranta system klasyfikacji jakości pryzmatów z wykorzystaniem sieci neuronowych (rozdz. 5.1.4) oraz system automatycznego pomiaru chromatyczności oświetlenia nawigacyjnego lotniska (rozdz. 5.2.5). Dodatkowo należy zauważyć, że zastosowane przez Autora rozwiązania bazujące na sieciach neuronowych znacząco usprawniają zautomatyzowany proces inspekcji portu lotniczego.

Wymienione wyżej wybrane wyniki badań i metod przetwarzania obrazu można wykorzystać w innych pracach naukowych i badawczo-rozwojowych z zakresu metod sztucznej inteligencji.

7. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę?

- a) *nie spełniająca wymagań stawianym rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy,*
- b) *wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,*
- c) *spełniająca wymagania,*
- d) *spełniająca wymagania z nadmiarem,*
- e) **wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie.**

Podsumowanie

Biorąc powyższe pod uwagę oceniam, że Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością problematyki związanej z tematyką rozprawy. Uzyskane wyniki analiz i pomiarów potwierdzają, że zastosowanie sieci neuronowych w obszarze systemów wbudowanych znacząco usprawnia zautomatyzowany proces inspekcji wizyjnej płaszczyzn lotniskowych. Zadania badawcze zostały w całości zrealizowane przez Doktoranta z wyraźnym określeniem funkcjonalności opracowanych oryginalnych algorytmów. Istotny jest również wkład Autora w praktyczną implementację koncepcji systemu pomiarowego wykorzystanego do badań eksperymentalnych na terenie portu lotniczego Poznań–Ławica.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Jakuba Sudera stanowi interdyscyplinarne, nowatorskie, szerokie i oryginalne rozwiązanie problemu naukowego z zaplanowanymi precyzyjnie badaniami, co potwierdza ogólną wiedzę kandydata w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Recenzowana praca doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z Ustawą o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. z 2017 r. poz. 1789), oraz zgodnie z Ustawą z 20 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1668 z póź. zm.) w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, zatem wnoszę o przyjęcie rozprawy i jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Mój wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej podyktowany jest nie tylko wysokimi walorami poznawczymi i użytkowymi rozprawy, ale również bogatym dorobkiem publikacyjnym Doktoranta związanym z tematyką rozprawy.

