

prof. dr hab. inż. Paweł Strumiłło
Instytut Elektroniki
Politechniki Łódzkiej



10 stycznia 2025 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY DYSCYPLINY NAUKOWEJ AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA,
ELEKTROTECHNIKA I TECHNOLOGIE KOSMICZNE POLITECHNIKI POZNAŃSKIEJ

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

Autor rozprawy: mgr inż. Jakub Suder

Promotor: prof. dr hab. inż. Adam Dąbrowski

I. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono trafnie i jasno sformułowane?

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy zastosowania technik obliczeniowych wykorzystujących metody sztucznej inteligencji w inspekcji płaszczyzn lotniskowych. Podstawowe obszary inspekcji obejmują drogi startowe, kołowania oraz płyty postojowe. Autor rozprawy skoncentrował się na trzech aspektach inspekcji: 1) wykrywaniu obiektów obcych (ang. *Foreign Object Debris, FOD*) lub ich części, 2) wykrywaniu poziomych oznaczeń lotniskowych oraz 3) klasyfikacji lamp oświetlenia nawigacyjnego zagłębionych w płaszczyźnie lotniskowej. Są to kluczowe aspekty decydujące o bezpieczeństwie i sprawności operacji lotniskowych. We wstępie pracy Autor odpowiednio szczegółowo i jasno uzasadnił potrzebę podjęcia ww. obszarów badawczych. Postawił 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.

Wersja angielska tezy pracy jest następująca (wg tłumaczenia Autora): *Proposed vision preprocessing methods, together with neural network solutions within the domain of embedded systems, substantially improve and facilitate the automated inspection processes at the airports.*

Tematyka rozprawy jest zgodna z zaleceniami Agencji Unii Europejskiej ds. Bezpieczeństwa Lotniczego (EASA), m.in. *Artificial Intelligence Roadmap 2.0*, w których wskazuje się, aby w technikach inspekcji płaszczyzn lotniskowych wykorzystywać metody uczenia maszynowego, w tym uczenia głębokich sieci neuronowych.

Warto podkreślić, że badania referowane w rozprawie były prowadzone we współpracy Zakładu Układów Elektronicznych i Przetwarzania Sygnałów Politechniki Poznańskiej z Portem Lotniczym Poznań-Ławica.

II. Czy autor rozwiązał postawiony problem i czy użył do tego właściwych metod dowodząc, że posiadał umiejętności związane z metodyką i metodologią prowadzenia badań naukowych?

Autor skoncentrował się na następujących obszarach badań w zakresie inspekcji płaszczyzn lotniskowych:

1. Wykrywanie ciał obcych
2. Wykrywanie poziomych oznaczeń lotniskowych
3. Klasyfikacja lamp zagłębionych w płaszczyźnie lotniskowej i ocena ich chromatyczności

Ad. 1. Do rozwiązania tego problemu badawczego Autor wykorzystał dostępną bazę obrazów FOD-A. Baza ta składa się z obrazów rejestrowanych w świetle widzialnym oraz obrazów termowizyjnych. Każdy z 19975 obrazów bazy wykorzystany do badań jest opatrzony informacją o typie obiektu, które przyporządkowano do 107 klas. Drugą z baz (PUT dataset) wykorzystanych w badaniach jest autorska baza 1480 obrazów zarejestrowanych na lotnisku Poznań-Ławica, która zawiera 108 różnych obiektów. Obydwie bazy składają się z obrazów o dużej rozdzielczości nie mniejszej niż 2048 x 1080 punktów. Obrazy te zostały powielone z zastosowaniem techniki augmentacji.

W pierwszym etapie badań Autor zastosował metodę k-średnich do klasyfikacji obrazów poddanych uprzednio przetwarzaniu wstępnemu i segmentacji obszarów obrazu różniących się od tła. Wyniki wykrywania obiektów były jednak niezadawalające, gdyż dokładność detekcji obiektów była nie większa niż 74%.

W drugim etapie badań Autor zastosował modele głębokich sieci neuronowych GoogLeNet (w środowisku Matlab) oraz YOLOv5 (w środowisku Google Colab). Sieci te trenowano na bazie obrazów FOD-A a testowano na zbiorze PUT dataset. Osiągnięto czułość oraz wartość predykcijną dodatnią przekraczające 95% co należy uznać za bardzo dobre wyniki biorąc pod uwagę różnorodność wykrywanych rodzajów i kształtów obiektów oraz różne warunki rejestracji obrazów. Warto podkreślić, że dla znacznie rozszerzonego zbioru danych obejmującego ponad 19000 obrazów z bazy FOD-A i modelu sieci YOLOv5 osiągnięto dokładność większą niż 99% co stanowi najlepszy wynik spośród wyników dokumentowanych w literaturze dla bazy FOD-A (pozycje literatury [58-62]). Stwierdzono również, że zwiększanie rozdzielczości obrazów powyżej 400x400 nie skutkowało poprawą dokładności detekcji. Jest to ważny wniosek z punktu widzenia minimalizacji kosztu obliczeniowego zaproponowanej metody klasyfikacji obrazów.

Ad. 2. Do wykrywania poziomych oznaczeń lotniskowych wykorzystano nagrania wideo PLAVS1 (Poznań Ławica Airport Video Set 1), obejmujący ponad 300 minut nagrań o objętości ponad 98 GB obrazujących pasy startowe, drogi kołowania i płyty postojowe w różnych warunkach meteorologicznych i porach dnia. Obrazy wideo rejestrowano z szybkością 60 obrazów na sekundę a każdy obraz cyfrowy z rozdzielczością 1920x1080 punktów. Autor porównał skuteczność trzech algorytmów wykrywania linii w oznaczeniach lotniskowych, w których zastosowano takie metody jak wyrównywanie histogramu obrazu, konwersję składowych koloru RGB do przestrzeni HSV, detekcję konturów wielokrokową metodą Cannego oraz transformację Hougha.

Zbadał również wpływ zmiany rozdzielczości obrazów na dokładność wykrywania linii w obrazach. W szczególności pokazał, że najskuteczniej działa algorytm, w którym dokonano przekształcenia przestrzeni kolorów do składowych HSV, a osiągnięta dokładność wyznaczania linii wyniosła 99,9%. Dodatkową zaletą tego algorytmu jest niezależność od rozdzielczości analizowanych obrazów i charakteryzuje się wysoką skutecznością dla obrazów o rozdzielczości 320x180 punktów. Dodatkowym wartościowym badaniem przeprowadzonym przez Autora jest analiza czasu obliczeń testowanych algorytmów uruchamianych na różnych platformach obliczeniowych obejmujących różne wersje modułów Jetson oraz Raspberry Pi. Autor przeprowadził również analizę energii wymaganej do implementacji omawianych algorytmu na tych platformach.

Ad. 3. W tym obszarze badań Autor przeprowadził ocenę stopnia zużycia pryzmatów lamp zagłębionych w płaszczyznach lotniskowych oraz zbadał chromatyczność światła emitowanego przez te lampy, które powinny spełniać odpowiednie normy międzynarodowe. W badaniach tych wykorzystano autorski zbiór obrazów wideo PLAVS2 (Poznań Ławica Airport Video Set 2) składający się z 1004 obrazów lamp. Z uwagi na przedmiot badań tych obrazów cyfrowych rejestrowano je z 24-bitową dokładnością oraz rozdzielczością przestrzenną 4928x3264 punktów. Autor opracował szereg oryginalnych technik rejestracji obrazów do wykrywania tzw. obszaru zainteresowania (ang. Region of Interest, RoI) zawierającego badaną lampę oraz zastosował specjalny system oświetlenia rejestrowanego fragmentu płaszczyzny lotniska i dobrał odpowiednie czujniki chromatyczności światła. Pryzmaty lamp sklasyfikował wg 3 kryteriów, I. pryzmat nieuszkodzony, II. pryzmat uszkodzony, III. niemożliwa ocena jakości pryzmatu. Dla klasyfikatora neuronowego typu MLP uzyskał dokładność klasyfikacji na poziomie 81,4%, natomiast zastosowany model sieci neuronowej GoogLeNet osiągnął dokładność klasyfikacji 88,4% (m.in. dzięki zapewnienie podobnej liczby obrazów w każdej klasie). Wynik ten należy uznać za bardzo dobry.

Autor zbadał również chromatyczność światła emitowanego przez lampy zagłębione w płaszczyznach lotniskowych w celu porównania jej z normami Agencji Bezpieczeństwa Lotniczego Unii Europejskiej. Badania w tym zakresie zostały przeprowadzone dla pięciu kolorów lamp wykorzystywanych na płaszczyznach lotniskowych. Autor przeprowadził szczegółową analizę i dobór czujników chromatyczności. Wskazał 6-kanalowy czujnik widma światła widzialnego AS7262 jak spełniający warunki techniczne dla rozpatrywanego zastosowania oraz przeprowadził testy (laboratoryjne i lotniskowe) czujnika do badania lamp zagłębionych w płaszczyznach lotniskowych (m.in. zbadał wynik badania chromatyczności dla różnych odległości czujnika od lampy). Z kolei wybrał czujnik TCS3430 do oceny chromatyczności lamp nawigacyjnych i przeprowadził szczegółowe testy laboratoryjne i lotniskowe tego czujnika. Opracował oprogramowanie umożliwiające ocenę chromatyczności lamp i wizualizację barwy lamp w diagramie chromatyczności CIE 1931 (fr. *Commission Internationale de l'Eclairage*).

Stwierdzam, że wyżej opisane problemy badawcze podjęte przez Doktoranta mają charakter naukowy a użyte metody badawcze są prawidłowe. Autor rozprawy wykazał się umiejętnością rozwiązywania problemów badawczych i zastosował odpowiednią metodykę badawczą, m.in. zapewnił odpowiednio duże, w tym autorskie, bazy obrazów, a wnioski z badań mają dużą wartość praktyczną.

III. Czy tematyka rozprawy jest aktualna i dostatecznie ważna?

Autor rozprawy podjął się ważnego problemu badawczego, którego wyniki mogą podnieść bezpieczeństwo oraz sprawność operacji lotniskowych. Skoncentrował się na trzech aspektach inspekcji płaszczyzn lotniskowych. Pierwszy dotyczy wykrywania obcych obiektów, które mogą doprowadzić do poważnych uszkodzeń samolotu, w drugim dokonuje oceny poziomych oznaczeń lotniskowych, które są kluczowe dla wykonywania operacji lotniczych w warunkach złej widoczności, a w trzecim dokonuje oceny jakości oświetlenia zagłębionego w płaszczyznach lotniskowych, w tym oświetlenia nawigacyjnego.

Cytowana w pracy literatura świadczy o aktualności tematyki badawczej podjętej w recenzowanej rozprawie. Obecnie po okresie pandemii obserwuje się dużą dynamikę wzrostu lotniczego transportu pasażerów i towarów.

IV. Na czym polega oryginalny dorobek autora i jakie jest jego znaczenie poznawcze lub przydatność praktyczna dla nauki bądź techniki?

Do głównych osiągnięć naukowych Autora rozprawy stanowiących istotny wkład do dyscypliny Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne w zakresie zastosowania wyników badań zaliczam:

1. Zbudowanie autorskiej bazy obrazów *PUT dataset* oraz opracowanie oprogramowania do wykrywania i klasyfikacji obcych obiektów płaszczyznach lotniskowych (m.in. z zastosowaniem konwolucyjnych sieci neuronowych).
2. Opracowanie oprogramowania do przetwarzania obrazów płaszczyzn lotniskowych i wykrywania poziomych oznaczeń lotniskowych,
3. Opracowanie metody oceny chromatyczności światła emitowanego przez dany punkty świetlne zagłębione w płaszczyźnie lotniska i ich analiza porównawcza z normami Agencji Bezpieczeństwa Lotniczego Unii Europejskiej.
4. Implementacja opracowanych algorytmów przetwarzania i analizy obrazów na platformach systemów wbudowanych NVIDIA Jetson (wyposażonych w procesor ARM i procesory wielordzeniowe CUDA) oraz zbadanie wydajności obliczeniowej algorytmów uruchamianych na tych platformach.
5. Opracowanie urządzenia pomiarowego do automatycznego testowania poprawności funkcjonowania oświetlenia drogi startowej oraz dróg kołowania (prototyp systemu otrzymał I nagrodę w konkursie Federacji Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych NOT w roku 2018 oraz w konkursie IEEE Thesis Contest w 2019 r.)

Ww. osiągnięcia badawcze Autora rozprawy zostały udokumentowane we współautorskich artykułach w czasopismach i referatach konferencji naukowych, w tym w dziesięciu czasopismach znajdujących się w wykazie czasopism punktowanych Ministerstwa Nauki (w siedmiu z tych artykułów Autor rozprawy jest pierwszym autorem). Artykuły te opublikowano w latach 2019–2023.

V. Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy autora, wiedzy na zaawansowanych poziomie, o charakterze podstawowym dla dziedziny nauk technicznych oraz o charakterze szczegółowym, odpowiadającej obszarowi prowadzonych badań naukowych?

Dużą część rozprawy, tj. pierwsze dwa rozdziały poświęcono wprowadzeniu do tematyki pracy, przeglądowi podstawowych metod przetwarzania i analizy obrazów oraz omówieniu tzw. systemów wbudowanych pod kątem zastosowań w analizie obrazów. Wybrane fragmenty tej części pracy uważam za poprawnie, ale zbyt szczegółowo omówione, gdyż zawierają podstawowe, szeroko znane metody przetwarzania obrazów, są to m.in.: przekształcenia afiniczne obrazów, operacje morfologiczne, filtry gradientowe, zniekształcenia geometryczne obrazów itd. Jednocześnie, stwierdzam, że Autor wykazał się pogłębioną wiedzą z zakresu technik uczenia głębokich sieci neuronowych. Szczególnie wysoko oceniam wiedzę Autora w zakresie tematyki dotyczącej systemów wbudowanych do zastosowań wizyjnych, których najnowsze architektury szczegółowo omówił w pracy.

Wymienione wyżej elementy rozprawy świadczą o szerokiej o dogłębnej wiedzy Autora z zakresu dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Wiedza ta była konieczna do wykazania postawionej tezy rozprawy.

VI. Czy rozprawa obejmuje najnowsze osiągnięcia nauki i świadczy o znajomości współczesnej literatury z dyscypliny naukowej, której dotyczy?

Do wykazania tezy rozprawy Autor zastosował najnowsze techniki uczenia głębokiego oraz najnowsze dostępne systemy wbudowane. Wykaz literatury zamieszczonej w pracy liczy 196 pozycji w tym 22 publikacje współautorskie Autora rozprawy. Zdecydowana większość cytowanej literatury pochodzi ostatniego lub poprzednich lat. Świadczy to o aktualnej wiedzy i szerokiej znajomości współczesnej literatury światowej. Uwagę zwraca bardzo mała liczba pozycji literatury krajowej w tematyce rozprawy (z wyłączeniem publikacji Autora i Politechniki Poznańskiej). Czy prace badawcze o podobnej tematyce nie są prowadzone w Polsce w innych ośrodkach?

VII. Jakie są wady i słabe strony rozprawy?

Praca jest przygotowana estetycznie pod względem redakcyjnym i graficznym. Zawiera obszerny opis przeprowadzonych badań i liczy 218 stron.

Nie zauważyłam istotnych braków merytorycznych, które podważyłby moją pozytywną ocenę osiągnięć badawczych opisanych w niniejszej rozprawie, natomiast moje uwagi do pracy są następujące:

1. W pierwszej sekcji mojej recenzji rozprawy zamieściłem wersję polską i angielską tezy rozprawy. Jeżeli uznać wersję polską za obowiązującą to bardziej wierne (niż zamieszczone w pracy) tłumaczenie rozprawy w języku angielskim mogłoby np. brzmieć: *Modified image processing methods together with solutions based on neural networks within the domain of embedded systems substantially improve and facilitate automated inspection process at the airport*. Niezależnie od wymienionej rozbieżności tezę tę uważam za zbyt ogólnie

sformułowaną. Czytelnik nieznający treści rozprawy mógłby interpretować tę tezę jako odnoszącą się do inspekcji bagaży, pasażerów lub samolotów. W tezie powinna znaleźć się informacja, że inspekcja dotyczy płaszczyzn lotniskowych, np. w brzmieniu ...*automated vision inspection of aerodrome*.

2. Za nadmiarowy uważam materiał znajdujący się w sekcji 2.2.1 pracy, w której Autor zamieszcza opis przegląd znanych metod przetwarzania i analizy obrazów. Odniesień do niektórych z tych metod nie doszukałem się w części aplikacyjnej pracy. Dla przykładu, czy Autor stosował operacje morfologiczne na obrazach i jakie? Czy dokonywał korekcji zniekształceń geometrycznych rejestrowanych obrazów?
3. Proszę o bardziej szczegółowy opis procedur przetwarzania obrazów zastosowanych w schemacie blokowym pokazanym na rys. 3-7 pracy. Opis tego schematu zawarty w pracy jest zbyt ogólny.
4. W opisie baz obrazów Autor wspomina o dużej rozdzielczości rejestrowanych obrazów. Następnie zaznacza, że analizowano obrazy o dużo mniejszej rozdzielczości np. 256x256 punktów. Jak dokonywano operacji zmniejszenia rozdzielczości przestrzennej obrazów?

VIII. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę?

Z uwagi na szeroki zakres i wysoki poziom badań naukowych przedstawionych w rozprawie, potwierdzony licznym i wartościowym dorobkiem publikacyjnym, osiągnięcia Autora rozprawy oceniam za wyróżniające.

Wniosek końcowy

Ponieważ przedłożona do recenzji rozprawa:

- dokumentuje samodzielne rozwiązanie problemu naukowego,
- zawiera opis oryginalnych osiągnięć badawczych (wymienionych w sekcji IV niniejszej recenzji) stanowiących istotnym wkład do dyscypliny naukowej Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne,
- prezentuje szeroką i dogłębną wiedzę Kandydata w ww. dyscyplinie naukowej,

stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr Jakuba Sudera spełnia z nadmiarem wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora. Wniosuję do Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne Politechniki Poznańskiej o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Sudera do publicznej obrony.

