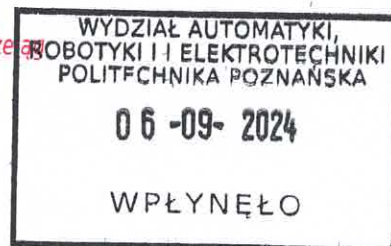


dr hab. inż. Przemysław Ptak
Profesor Uniwersytetu Morskiego w Gdyni

PRZEWODNICZĄCY RADY DISCYPLINY
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne
Gdynia, 04.09.2024 r.
prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaża

2024-09-09



RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

złożonej przed

Radą Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne
Politechniki Poznańskiej

celem uzyskania stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk
inżyniersko-technicznych w ww. dyscyplinie

Tytuł rozprawy doktorskiej:

**„System sztucznej inteligencji wspomagający wykonywanie autonomicznych oprysków
sadowniczych”**

Autor rozprawy doktorskiej: mgr inż. Piotr Góral

Promotor rozprawy doktorskiej: prof. dr hab. inż. Adam Dąbrowski

Promotor pomocniczy rozprawy doktorskiej: dr inż. Paweł Pawłowski

Podstawa formalna opracowania recenzji: pisemne zlecenie recenzji rozprawy doktorskiej, otrzymane od Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej, Pana prof. dr hab. inż. Wojciecha Szelaży zgodnie z uchwałą ww. Rady Dyscypliny z dnia 18 czerwca 2024 r.

1. Cel, teza oraz zakres przedstawionej rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Górala dotyczy badań nad innowacyjnymi metodami wykonywania zautomatyzowanych oprysków sadowniczych. Analizie został poddany aktualny stan wiedzy związanej z zastosowaniem algorytmów sztucznej inteligencji oraz wykorzystaniem głębokich spłotowych sieci neuronowych do sterowania zautomatyzowanymi pojazdami ogrodniczymi. Przygotowana została propozycja systemu sztucznej inteligencji w celu wspomaganie wykonywania oprysków sadowniczych za pomocą specjalnie zmodyfikowanych urządzeń sadowniczych. Modyfikacje te polegały na zainstalowaniu specjalnych układów sterujących oraz wizyjnych pozwalających na autonomiczną pracę zaproponowanego systemu. Opracowane przez doktoranta rozwiązania pozwalają na ograniczenie stosowanych środków chemicznych oraz oszczędność wody wykorzystywanej do oprysków sadowniczych. Do przeprowadzenia badań eksperymentalnych wykorzystane zostały głównie modele głębokich spłotowych sieci neuronowych.

W związku z powyższym **celem** prowadzonych prac było zastosowanie metod sztucznej inteligencji do wspomaganie podejmowania decyzji o zabiegach sadowniczych, minimalizujących liczbę oprysków i ilość wykorzystywanych w tym celu środków ochrony roślin, a także do eliminacji bezpośredniego udziału operatora, czyli do zapewnienia pełnej ochrony człowieka od ekspozycji na stosowane środki chemiczne.

Doktorant jasno sprecyzował tezę rozprawy doktorskiej, która brzmi następująco:

„Dzięki zastosowaniu zaproponowanego inteligentnego systemu wizyjnego do rozpoznawania chorób i szkodników drzew owocowych oraz detekcji drzew, a także opracowanego zrobotyzowanego bezzałogowego sprzętu do oprysków sadowniczych, zapewnia się poprawę precyzji oprysków, ograniczenie ilości stosowanych środków chemicznych i wody, poprawę jakości owoców a ponadto ochronę sadownika przed ekspozycją na szkodliwe środki chemiczne”

Doktorant, aby udowodnić postawioną tezę wykonał badania eksperymentalne z użyciem specjalnie przygotowanego stanowiska badawczego. Na doświadczalnej plantacji sadowniczej o wymiarach 500 x 30 m, z rzędami drzew owocowych dokonywano zabiegów za pomocą wyposażonego w system bezprzewodowej automatyki sterującej ciągnika z opryskiwaczem sadowniczym. Założono, że kluczowe dane do sterowania opryskiwacza pochodzić będą z systemu wizyjnego zainstalowanego na ciągniku. Obrazy pozyskane z urządzeń wizyjnych poddane zostały przetwarzaniu w celu pozyskania informacji służących kalibracji i ustalenia parametrów oprysku. Ponadto, włączono zmodernizowany ciągnik i opryskiwacz sadowniczy w system sztucznej inteligencji wspomagający wykonywanie oprysków sadowniczych na podstawie analizy danych pochodzących z modułowego systemu wizyjnego. Automatycznej analizie poddano obrazy pozyskane ze stałego monitoringu szkodników, które to obrazy zostały przechwycone przez zainstalowane fotonapędki na badanej plantacji sadowniczej oraz przez układy wizyjne zamontowane na ciągniku sadowniczym.

Po analizie rozprawy doktorskiej stwierdzam, że ma ona zdecydowanie charakter teoretyczno-konstrukcyjno-eksperymentalny.

2. Charakterystyka poszczególnych części składowych rozprawy doktorskiej

Doktorant na samym wstępie wyjaśnił najważniejsze skróty i oznaczenia w rozpatrywanej rozprawie doktorskiej, co znacznie ułatwiło analizę tej rozprawy, a także przedstawił streszczenie rozprawy doktorskiej w wersji polskiej oraz angielskiej. Merytoryczna część rozprawy doktorskiej składa się z pięciu rozdziałów i zawiera 101 stron nie wliczając obszernej bibliografii.

W rozdziale pierwszym dokonano wprowadzenia w problematykę przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Górala. W rozdziale tym przedstawiono również cel prowadzonych badań eksperymentalnych oraz sformułowano tezę naukową, a także w kilku punktach przedstawiono zakres i strukturę recenzowanej rozprawy doktorskiej.

W rozdziale drugim przedstawiono aktualny stan wiedzy i technologii w obszarze nowoczesnego ogrodnictwa i sadownictwa. Doktorant zdefiniował w jakich obszarach ogrodnictwa i sadownictwa są wykorzystywane algorytmy sztucznej inteligencji oraz wskazuje, że obecny poziom rozwoju systemów sztucznej inteligencji pozwala na ich zastosowanie niemal we wszystkich obszarach związanych z produkcją ogrodniczą i sadowniczą, gdzie wykorzystywać mogą algorytmy uczenia maszynowego, w tym sztuczne sieci neuronowe.

Głównym trzonem pracy są rozdziały od trzeciego do piątego. W rozdziale trzecim przedstawiono propozycję systemu wspomagającego wykonywanie autonomicznych oprysków sadowniczych. Opracowany system wykorzystuje rozwiązania z obszaru przetwarzania obrazów i algorytmów sztucznej inteligencji w celu realizacji poszczególnych zadań. Do zadań opracowanego przez doktoranta systemu należą analiza stanu plantacji, wspomaganie podejmowania decyzji o wykonaniu oprysku oraz przeprowadzenie samego oprysku w sposób autonomiczny lub zdalnie sterowany. W rozdziale trzecim przedstawiono również szczegółowe założenia dotyczące systemu wizyjnego oraz szczegółowo opisano wykorzystywane algorytmy sztucznej inteligencji, a także spłotowe sieci neuronowe, które to są wykorzystywane w opracowanym systemie do analizy rejestrowanych obrazów. W rozdziale czwartym doktorant przedstawił część eksperymentalną przedłożonej rozprawy doktorskiej. Bardzo szczegółowo opisano proces modernizacji ciągnika oraz

opryskiwacza sadowniczego, co pozwoliło tym urządzeniom na pracę w trybie autonomicznym. Szczegółowo zostały opisane układy sterujące oraz wykonawcze umożliwiające opisywaną modernizację i pracę w trybie autonomicznym. W rozdziale tym zostały również przedstawione szczegółowe wyniki badań i eksperymentów dotyczące przetwarzania obrazów z funkcją augmentacji danych, wyniki detekcji szkodników sadowniczych oraz wyniki dotyczące wybranych cech drzew sadowniczych. W rozdziale piątym doktorant przedstawił wnioski końcowe i szczegółowe podsumowanie przeprowadzonych badań.

3. Ocena zastosowanych algorytmów sztucznej inteligencji oraz przedstawionych wniosków

Analizując wykorzystane algorytmy sztucznej inteligencji należy zauważyć, jak dużo pracy doktorant włożył w przeanalizowanie możliwości różnych algorytmów sztucznej inteligencji oraz modeli sieci neuronowych. Uzasadnieniem tej tezy jest duża liczba operacji przetwarzania obrazów z różnych etapów działania głównego algorytmu decyzyjnego, sterowania ciągnikiem i opryskiwaczem, a także analizy obrazów samych drzew oraz ich liści w celu diagnozowania chorób drzew owocowych. Należy również zauważyć, że analiza obrazów była również wykorzystywana do nawigacji autonomicznego zestawu sadowniczego. Tak wielodrogowa analiza obrazów wymagała od doktoranta odpowiedniej optymalizacji zastosowanych algorytmów sztucznej inteligencji, co pomogło zaimplementować odpowiednie algorytmy w komputerach jednoukładowych. Należy także zwrócić uwagę na fakt, jak duże ilości zdjęć doktorant musiał wykonać albo pozyskać z urządzeń autonomicznych w celu wytrenowania wykorzystanych modeli splotowych i głębokich sieci neuronowych.

Rezultat przeprowadzonych badań naukowych wskazuje, że opracowany system sztucznej inteligencji wspomagający wykonywanie oprysków sadowniczych pozwala na wykonywanie precyzyjnych oprysków. Przeprowadzone zostały eksperymenty na przygotowanym stanowisku badawczym, którym był zmodernizowany ciągnik i opryskiwacz sadowniczy w warunkach plantacji sadowniczej. Wyniki eksperymentów wskazują, że zastosowanie algorytmów wizyjnych do sterowania zautomatyzowanym ciągnikiem i opryskiwaczem przynosi oszczędności wynikające ze stosowanej do oprysków wody i środków ochrony roślin na poziomie niemal 30 %. Doktorant wskazał również, że można zauważyć większe wahania dokładności podczas procesu uczenia dla zbioru walidacyjnego, w stosunku do wyników uzyskanych dla zbioru uczącego. Wynik jest powiązany z mniejszym rozmiarem zbioru walidacyjnego. Podczas procesu testowania nie wykryto znaczącego nadmiernego dopasowania modelu. Ponadto doktorant zastosował silne metody augmentacji danych. W przypadku klasyfikacji drzew zdrowych i zainfekowanych uzyskane wyniki są jeszcze wyższe i mają średnią dokładność 98,82 % na zbiorze danych testowych, dla modelu NasNetLarge.

4. Ocena doboru źródeł bibliograficznych

Bibliografia recenzowanej rozprawy doktorskiej obejmuje 128 pozycji tematycznie mocno powiązanych z rozprawą dokorską. Należy zauważyć, że w skład bibliografii wchodzi zarówno czasopisma o wysokim współczynniku IF (Impact Factor), a także takie czasopisma jak *Przegląd Elektrotechniczny*, czasopismo z wydawnictwa MDPI, materiały konferencji krajowych jak i międzynarodowych. W wykazie pozycji literaturowych (1.3.1) w których doktorant był współautorem znajduje się 10 publikacji, w tym jedna praca w czasopiśmie *Electronics* gdzie doktorant jest wiodącym autorem. Doktorant posiada również dwie prace w czasopiśmie *Przegląd Elektrotechniczny*, gdzie również jest wiodącym autorem.

5. Analiza możliwego zastosowania praktycznego przedstawionych wyników badań

Z punktu widzenia wydajności uprawy oraz jakości produkowanych owoców najistotniejszymi zabiegami sadowniczymi są opryski ochronne. Klasyczna metoda oprysków polega na prowadzeniu opryskiwacza sadowniczego za pomocą ciągnika napędzanego w większości przypadków silnikiem spalinowym. Doktorantowi udało się ten etap oprysków zautomatyzować, poprzez opracowanie

zautomatyzowanego systemu sterującego z wykorzystaniem algorytmów wizyjnych bazujących na splotowych i głębokich sieciach neuronowych zasilanych danymi wejściowymi z systemów wizyjnych. Należy zauważyć, iż doktorant wskazuje, że tylko bardzo mała ilość gospodarstw sadowniczych może sobie pozwolić na zakup komercyjnych autonomicznych systemów sadowniczych, co wiąże się z dużymi kosztami, liczonymi w milionach złotych. Doktorant w swoich rozważaniach wskazuje możliwość komercjalizacji rozwiązań, które wykorzystał do opracowania autonomicznego systemu opryskowego. Należy zauważyć, że zastosowanie geodezyjnych systemów pozycjonujących pozwoliłoby na odciążenie komputera jednoukładowego stosowanego do przetwarzania obrazów i nawigacji opartej na przetwarzaniu obrazów w czasie rzeczywistym.

Należy zauważyć, że rozwiązania wykorzystujące automatyzację już istniejących urządzeń sadowniczych nie zamyka możliwości inwestycyjnych w innowacyjne technologie wspomagające produkcję owoców małym i średnim gospodarstwom sadowniczym. Analizując rynek rolnictwa w Polsce można zauważyć, że automatyzacja oraz algorytmy sztucznej inteligencji nie występują tylko i wyłącznie w sadownictwie i ogrodnictwie, te rozwiązania można także zauważyć przy hodowli bydła oraz trzody chlewnej.

6. Analiza wad i słabych stron w rozprawie doktorskiej

Doktorant w przedstawionej do oceny rozprawie doktorskiej popełnił kilka błędów edycyjnych, natomiast nie zauważyłem dużych błędów merytorycznych, które spowodowałyby negatywną ocenę przedstawionej pracy doktorskiej. Poniżej postaram się przedstawić błędy oraz niejasności, które doktorant może wyjaśnić w osobnym piśmie przewodnim oraz podczas obrony rozprawy doktorskiej.

- Na rysunku 1.2 doktorant przytacza wartości rynkowe dla prognoz wzrostu wartości nowoczesnych rozwiązań w rolnictwie. Moim zdaniem wartość rynku należałoby podać w realnych kwotach (w USD lub PLN).
- Analizując cały tekst pracy pojawiły się miejsca, gdzie rysunki w tekście były cytowane nie w kolejności pojawiania ich się w pracy doktorskiej. Takie rozwiązanie powoduje trudności w analizie rozprawy doktorskiej.
- Należy zauważyć, że doktorant podczas przygotowywania rozprawy doktorskiej zostawiał w pewnych fragmentach zbyt dużo wolnego miejsca na stronach. Moim zdaniem od nowych stron należy zaczynać tylko i wyłącznie nowe rozdziały rozprawy doktorskiej, a nie zostawiać pustego miejsca przed podrozdziałami.
- W niektórych przypadkach należy zauważyć bardzo słabą jakość rysunków oraz opisów poszczególnych bloków na schematach zawartych w rozprawie doktorskiej. Moim zdaniem jest to spowodowane nieodpowiednią metodą wklejania rysunków w tekście. Podczas takich operacji należy używać rozszerzonych metaplików.
- Na rysunku 2.25 (str. 39) doktorant używa opisu „przełączniki”. Należy wyjaśnić czy są to przełączniki elektromagnetyczne czy przełączniki SSR (Solid State Relay). Kolejnym stwierdzeniem którego doktorant używa na tym rysunku jest „zawór elektryczny”. Powinniśmy stosować opis zawór elektromagnetyczny, ponieważ są to zawory sterowane za pomocą cewki na odpowiednie napięcie robocze (12 lub 24 V).
- Doktorant napisał, że w skonstruowanym przez siebie systemie sterowania zaworami elektromagnetycznymi używa metody PWM (Pulse Width Modulation). Proszę wyjaśnić, czy zastosowane zawory elektromagnetyczne pozwalają na częściowe ich otwarcie, czy może pracują w trybie „ON” lub „OFF”.
- Doktorant na rysunkach od 4.21 do 4.28 używał oznaczeń w języku angielskim. Należy zauważyć, że jeśli praca doktorska jest pisana w języku polskim, to w tym samym języku powinny być wykonywane oznaczenia rysunków. Ta sama uwaga dotyczy separatorów dziesiętnych. W pracach pisanych w języku polskim jako separatora dziesiętnego używamy

przecinka, a nie kropki. Ta uwaga dotyczy zarówno rysunków, jak i liczb umieszczanych w rozprawie doktorskiej.

- Doktorant w rozprawie doktorskiej nie wspominał o żadnej współpracy z innymi jednostkami naukowym lub przemysłowymi. Jeśli taka współpraca zaistniała to proszę doktoranta o wyjaśnienie i podanie jednostek z którymi nawiązał współpracę.

Należy podkreślić, że przedstawione uwagi nie umniejszają wysokiej ocenie merytorycznej ocenianej rozprawy doktorskiej oraz rozważaniom w niej zawartym. Doktorant może się odnieść do uwag w dodatkowym piśmie przewodnim do otrzymanej recenzji lub podczas obrony rozprawy doktorskiej.

7. Analiza ogólna przedstawionej rozprawy doktorskiej

Doktorant swoją rozprawę doktorską oparł w głównej mierze na dziesięciu publikacjach w których w większości był wiodącym współautorem. Można stwierdzić, że największy wpływ na jakość rozprawy doktorskiej wywarły wyniki badań eksperymentalnych opublikowane w czasopiśmie Electronics oraz w Przeglądzie Elektrotechnicznym, gdzie doktorant był pierwszym autorem.

Przedstawiona architektura systemu sztucznej inteligencji i przeprowadzone badania eksperymentalne wpisują się w obszar ogrodnictwa precyzyjnego, który optymalizuje obszar produkcji owoców poprzez minimalizowanie kosztów i podnoszenie wydajności produkcji. Wykorzystane modele do przeprowadzenia eksperymentów, których wyniki zostały przedstawione są częścią przygotowanego systemu sztucznej inteligencji wspomagającego wykonywanie autonomicznych oprysków sadowniczych.

Podsumowując, cel badawczy zrealizowanej rozprawy doktorskiej, którym było zastosowanie metod sztucznej inteligencji do wspomagania podejmowania decyzji o zabiegach sadowniczych, minimalizujących liczbę oprysków i ilość wykorzystywanych w tym celu środków ochrony roślin, a także do eliminacji bezpośredniego udziału operatora, czyli do zapewnienia pełnej ochrony człowieka od ekspozycji na stosowane środki chemiczne został zrealizowany.

Ostatecznie, przyjęta teza naukowa zakładająca, że dzięki zastosowaniu zaproponowanego inteligentnego systemu wizyjnego do rozpoznawania chorób i szkodników drzew owocowych oraz detekcji drzew, a także opracowanego zrobotyzowanego bezzałogowego urządzenia do oprysków sadowniczych, zapewnia się poprawę precyzji oprysków, ograniczenie ilości stosowanych środków chemicznych i wody, poprawę jakości owoców a ponadto ochronę sadownika przed ekspozycją na szkodliwe środki chemiczne została dowiedziona.

Do oryginalnych osiągnięć doktoranta można zaliczyć:

- Opracowanie systemu sztucznej inteligencji wspomagającego wykonywanie autonomicznych oprysków sadowniczych, w którym algorytmy wizyjne: wykonują inspekcję plantacji sadowniczej, dokonują detekcji szkodników drzew na pułapkach feromonowych, sygnalizują konieczność wykonania oprysku, wspomagają poruszanie się ciągnika po plantacji sadowniczej, klasyfikują stan rozwojowy drzew oraz realizują detekcję wysokości drzew.
- Modernizacja ciągnika sadowniczego i opryskiwacza poprzez: budowę podsystemu bezprzewodowej automatyki do bezzałogowego sterowania ciągnikiem oraz opryskiwaczem.
- Przygotowanie autorskiej bazy zdjęć do trenowania wybranych modeli sztucznych sieci neuronowych.
- Badanie dokładności metod wykorzystywanych do automatycznej analizy obrazów oraz do oszczędzania wody ze środkami ochrony roślin dzięki zastosowanemu wizyjnemu systemowi sterowania automatycznym opryskiwaczem sadowniczym.

Analizując wyniki badań eksperymentalnych zamieszczone w pracach doktoranta pozwalają wnioskować o bardzo dużej dojrzałości naukowej i inżynierskiej doktoranta. Recenzent zalicza recenzowaną rozprawę doktorską jako **w pełni spełniającą wymagania.**

Przedłożoną do oceny rozprawę doktorską mgr inż. Piotra Górala oceniam pozytywnie.

Stwierdzam, że praca doktorska spełnia warunki określone w art. 14 ust. 2 pkt.2 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789, z późn. zm.), a także § 6 ust. 1 Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r. poz. 261), w związku z art. 179 ust. 2 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669 z późn. zm.).

Wnoszę o dopuszczenie przedłożonej rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Górala do publicznej obrony.



dr hab. inż. Przemysław Ptak, prof. UMG