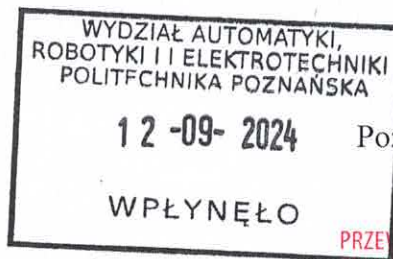


dr hab. inż. Henryk Ratajkiewicz  
Katedra Entomologii i Ochrony Środowiska  
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu



Poznań, 05.09.2024 r.

PRZEWODNICZĄCY RADY DISCYPLINY  
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika  
i Technologie Kosmiczne

prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaż

**Recenzja**  
**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Górala**  
**System sztucznej inteligencji wspomagający wykonywanie autonomicznych oprysków**  
**sadowniczych**

Przedłożona do oceny rozprawa została przygotowana  
pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Adama Dąbrowskiego  
i dr. inż. Pawła Pawłowskiego - promotora pomocniczego

### **1. Ocena doboru problematyki badawczej**

Zmiany klimatyczne, demograficzne i osiągnięcia technologiczne są jednymi z najważniejszych czynników kształtujących obraz współczesnego rolnictwa i ogrodnictwa. Ogrodnictwo jest dziedziną o wyjątkowo dużym zapotrzebowaniu na robociznę stąd w obliczu zmniejszającej się liczby osób chcących pracować w tej dziedzinie gospodarki zrozumiałym jest coraz częstsze poszukiwanie rozwiązań umożliwiających automatyzację produkcji. Szczególnie duża potrzeba wprowadzania robotów dotyczy zabiegów bardzo uciążliwych i niebezpiecznych dla człowieka, do których zalicza się stosowanie pestycydów. Współcześnie do autonomicznego opryskiwania w rolnictwie i ogrodnictwie używane są najczęściej bezzałogowe statki powietrzne. Dla potrzeb sadownictwa takie rozwiązanie nie wydaje się najlepsze, gdyż naniesienie rozpylonej cieczy w koronach drzew jest mniejsze i mniej równomierne niż po wykonaniu zabiegu powszechnie stosowanymi opryskiwaczami naziemnym ze wspomaganie strumieniem powietrza. W Polsce, w uprawie jabłoni zużywa się najwięcej środków ochrony roślin w porównaniu z innymi gatunkami uprawianymi w sadach, dlatego dąży się, aby zmniejszyć ilość stosowanych pestycydów i zarazem podwyższyć poziom bezpieczeństwa operatorów ciągników, którzy wykonują opryskiwanie. W uprawie czereśni potrzeba wykonywania zabiegów ochronnych wiąże się natomiast z krytycznym dla bezpieczeństwa żywności i człowieka okresem dojrzewania owoców. Współczesne technologie ochrony roślin kształtowane są pod wpływem oczekiwań społeczeństwa, które chce uzyskiwać owoce narażone w możliwie najmniejszym stopniu na pozostałości środków ochrony roślin. W interesie sadownika jest natomiast prowadzenie produkcji w sposób najbardziej ekonomiczny, skuteczny i bezpieczny dla jego zdrowia. Jedną z ważniejszych dróg prowadzących do wysokiej skuteczności zabiegów jest monitoring i sygnalizacja agrofagów. Problem, którego rozwiązania podjął się mgr inż. Piotr Góral jest niezwykle istotny dla ogrodnictwa. Biorąc pod uwagę wieloaspektowość podjętego problemu, osiągnięcie pozytywnego rozwiązania wymaga kompleksowego, systemowego podejścia. Wysunięta przez Autora hipoteza zakładająca, że inteligentny system wizyjnego rozpoznawania chorób i szkodników drzew owocowych oraz detekcji drzew, a także

zrobotyzowany bezzałogowy sprzęt do opryskiwania sadu, zapewnią poprawę precyzji zabiegów opryskiwania, ograniczą ilości stosowanych środków chemicznych i wody, przyczynią się do poprawy jakości owoców a ponadto ochronią sadownika przed ekspozycją na szkodliwe środki chemiczne jest słuszna.

## **2. Ocena wiedzy teoretycznej zaprezentowanej przez Autora**

Autor rozprawy przygotował się bardzo solidnie do zrealizowania postawionych sobie zadań i osiągnięcia wyznaczonych celów. Po ogólnym wprowadzeniu w problematykę rozprawy przedstawionym w rozdziale 1. w kolejnych rozdziałach czytelnik zostaje wprowadzony w poszczególne zagadnienia teoretyczne i zapoznany z systemem i funkcjonowaniem prezentowanego rozwiązania technologicznego oraz wynikami badań eksperymentalnych.

Rozdział 2. zatytułowany „Stan wiedzy i technologii w obszarze nowoczesnego ogrodnictwa” stanowi klasyczne i zarazem niezbędne wprowadzenie w to zagadnienie prezentując przy tym tło historyczne i kreśląc współczesne horyzonty. Uważam, że mgr inż. Piotr Góral wywiązał się bardzo dobrze z tego zadania, co świadczy o jego wiedzy teoretycznej i solidnym przygotowaniu do rozwiązania problemu poruszonego w dysertacji.

Autor kieruje uwagę na obszary gospodarowania ogrodnictwem w których znalazły zastosowanie algorytmy uczenia maszynowego. Diagnostyka chorób i szkodników oraz zabiegi opryskiwania to dwa spośród czterech najważniejszych zastosowań sztucznej inteligencji w ogrodnictwie. Autor nakreślił rys historyczny rozwoju technologicznego w ogrodnictwie począwszy od fazy 1.0 do 4.0 stwierdzając, że ta ostatnia faza jest intensywnie rozwijana osiągając poziom 3, zatem automatyzację produkcji z wykorzystaniem systemów autonomicznych.

Choć pierwsze próby i znaczące osiągnięcia powstawały za granicą, to na współczesnej mapie krajów z innowacyjnymi rozwiązaniami w tym zakresie znajduje się również Polska. Doktorant słusznie zauważa, że szczególnie ważna potrzeba tworzenia robotów dotyczy zabiegów bardzo uciążliwych i niebezpiecznych dla człowieka, do których zalicza się stosowanie pestycydów. Największe zagrożenie związane jest ze aplikacją pestycydów w uprawach roślin pod osłonami i w tej gałęzi ogrodnictwa znajdujemy już dość wiele wdrożonych do praktyki zrobotyzowanych opryskiwaczy. W sadownictwie zużywa się również bardzo wiele pestycydów na jednostkę powierzchni uprawy. Z treści omawianego rozdziału dowiadujemy się, że potrzeba opracowywania rozwiązań do autonomicznego opryskiwania w sadownictwie jest ogromna czemu towarzyszy równie duże zainteresowanie badaczy i coraz częstsze budowanie prototypów.

W podrozdziale (2.5) zatytułowanym „Systemy wizyjne w sadownictwie” został przedstawiony przegląd rozwiązań stosowanych w praktyce sadowniczej, jak i prototypowych służących do automatycznego rozpoznawania szkodników i chorób w sadownictwie, a następnie metod wizyjnej nawigacji pojazdu. Autor poprzedził te treści omówieniem procesu automatycznej analizy obrazu. Nie wchodząc w dalsze szczegóły, a przy tym uwzględniając treść przedstawioną w rozdziale 3. i częściowo także 4., stwierdzam, że rozprawa doktorska jest bardzo dobrym studium, w którym poszczególne zagadnienia zostały zaprezentowane w sposób usystematyzowany, przejrzysty, wyczerpujący tematykę i przystępny w odbiorze dla

czytającego. Autor ma wysoki poziom ogólnej wiedzy teoretycznej wykraczający poza dyscyplinę automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Na moje szczególne uznanie zasługuje bardzo dobra wiedza Autora z zakresu ochrony sadów przed organizmami szkodliwymi, a przede wszystkim przed parchem jabłoni i nasionnicą trześniówką, które stały się głównymi podmiotami badań.

### **3. Ocena umiejętności prowadzenia pracy naukowej**

Mgr inż. Piotr Góral zaproponował w rozprawie doktorskiej systemowe rozwiązanie dla problemu ochrony roślin sadowniczych przed wybranymi agrofagami, w rezultacie końcowym ciągnik z opryskiwaczem wykonuje autonomiczny zabieg opryskiwania. Już teraz mogę uznać, że jest to niewątpliwie wyjątkowo wartościowe oryginalne i nowatorskie rozwiązanie wykraczające wartością aplikacyjną daleko poza granice naszego kraju. Omówienie tych kwestii znajduje się w rozdziałach trzecim, czwartym i piątym.

Najpierw, w rozdziale 3., Autor omawia główne elementy systemu, który zaklasyfikować należy do poziomu Ogrodnictwa 4.0., a następnie przechodzi do dokładnej prezentacji działania modułów systemu wizyjnego, po czym skupia się na głównym algorytmie decyzyjnym i splotowych sieciach neuronowych. Cały system do zarządzania stosowaniem środków ochrony roślin składa się z 10 bloków i jest oryginalnym rozwiązaniem obejmującym wszystkie etapy niezbędne w klasycznym zarządzaniu ochroną roślin. Dodatkowo pojawiają się bloki, które są konieczne do wykonania autonomicznego opryskiwania. W skład systemu wchodzi bloki noszące kolejno następujące nazwy: monitoring chorób, wizyjny monitoring szkodników, przetwarzanie danych o chorobach i szkodnikach, strategie ochronne, prognoza pogody, podejmowanie decyzji, komunikat sadowniczy, mapa planacji, autonomiczny oprysk, przetwarzanie danych z inspekcji.

Modułowy system wizyjny jest „okiem ciała” całego systemu, generalizując, umożliwia odbieranie danych wizyjnych, ich przetwarzanie, wykrywanie obiektów i realizowanie wskazanych zadań na podstawie danych wyjściowych. W rezultacie końcowym system sztucznej inteligencji przedstawiony w rozprawie doktorskiej służy do sygnalizowania opryskiwania przeciwko organizmom szkodliwym, wyznaczania sygnałów kierowania ciągnikiem i sterujących elektrozaworami opryskiwacza, w tym ostatnim przypadku, po uprzednim obliczeniu wysokości i rozpoznaniu stanu rozwojowego drzewa. Działanie każdego z modułów wizyjnych jest realizowane dzięki specyficznemu algorytmowi. O ile nie podejmę się bliższej oceny całości modernizacji ciągnika Władimiriec T-25, w tym modułu wizyjnego, dzięki którym stało się możliwe przekształcenie go w robota autonomicznie poruszającego się po plantacji, która w mojej opinii została zrealizowana bardzo skutecznie, to zwrócę uwagę na pozostałe moduły kluczowe dla prowadzenia ochrony roślin w sadzie z pominięciem oceny szczegółowych kwestii związanych z działaniem sieci neuronowych.

Sygnalizowanie szkodników jak i stanów chorobowych drzew na podstawie sygnału wizyjnego jest zadaniem niełatwym a staje się ono niezwykle trudnym, wtedy gdy w grę wchodzi reakcja opryskiwacza w czasie rzeczywistym. Z taką sytuacją mamy tutaj do czynienia. W laboratorium procedura może trwać długo, w sadzie co najwyżej kilka sekund. Autor wybrał najrozsądniejszą i tradycyjną opcję, czyli rozdzielanie tych zadań w czasie. Sygnalizowanie potrzeby wykonania zabiegu przeciwko szkodnikowi (nasionnicy

trześniówce) jak i chorobie (parch jabłoni) odbywa się przed wykonaniem zabiegu na podstawie rezultatów odłowów much na pułapki i odpowiednio monitoringu (wizyjnego) zwilżania liścia i warunków mikroklimatycznych i przetwarzania danych w ramach kolejnych bloków systemu. Reakcja opryskiwacza w czasie rzeczywistym polegająca na włączaniu bądź wyłączaniu poszczególnych elektrozaworów sekcji opryskującej jest więc pochodną wysokości drzew z uwzględnieniem ich stanu rozwojowego, a i tak analiza obrazu wizyjnego na bieżąco jest bardzo kosztochłonna obliczeniowo. Doceniam zatem znalezienie takiego rozwiązania wykorzystującego splotową sieć neuronową, które podołało skutecznie temu zadaniu.

Proces podejmowania decyzji o zabiegach ochrony roślin jest skomplikowany i dlatego największa liczba bloków systemu dotyczy tego zagadnienia (blok 1-7 i 10). Autor poradził sobie z tym zadaniem doskonale integrując bloki w jeden sprawny system. Przydział zdań do poszczególnych bloków jest właściwy i związany bezpośrednio z czynnościami podejmowanymi przez sadownika. Procedura podejmowania decyzji jest logicznie uzasadniona i została przeprowadzona na wzór klasycznego procesu decyzyjnego stosowanego podczas zarządzania ochroną roślin przed organizmami szkodliwymi w sadzie. Zaproponowane przez mgr. inż. Piotra Górala rozwiązanie ma jednak istotną przewagę nad tradycyjnym podejściem. Dobrym przykładem jest sygnalizowanie nasionnicy trześniówki. Dzięki systemowi wizyjnemu cały proces odbywa się w sposób ciągły, bez długich przerw jakie mają miejsce podczas lustracji eksperckiej.

Z uwagi na podejście systemowe identyfikuję liczne innowacje, które Autor musiał opracować, aby uczynić system sprawnym, a niekiedy nawet sprawniejszym niż w klasycznym podejściu eksperckim. Moją uwagę kieruję na główny algorytm systemowy dedykowany zarządzaniu decyzją o podjęciu zabiegu przeciwko parchowi jabłoni. W zależności od odmiany jabłoni i warunków mikroklimatycznych występujących w sadzie opryskiwanie może być wykonywane kilkanaście razy w sezonie. Autor przygotował główny algorytm, w którym wprowadził, obok pełniącego podstawową rolę algorytmu „twardodecyzyjnego”, także algorytm „wagowodecyzyjny”. Całość zasługuje na uznanie z punktu widzenia operacyjnego, ponieważ takie rozwiązanie racjonalizuje podjęcie decyzji o zabiegu w warunkach nie w pełni sprzyjających skutecznemu zastosowaniu środka ochrony roślin w sytuacji wyższej konieczności, to jest ryzyka znacznej utraty jakości bądź ilości plonu przy nie zwiększonym zagrożeniu bezpieczeństwa żywności.

Na bardzo duże uznanie zasługuje to, że Autor podjął się pracy nad dwoma organizmami szkodliwymi. Moim zdaniem wystarczyłby jeden z nich, a i tak praca miałaby bardzo wysoką wartość. Mogę się tylko domyślać, że Autor w ten sposób może pokazać, że zaproponowany przez niego modułowy system może być w przyszłości stosunkowo łatwo rozbudowywany o następne bloki dedykowane kolejnym agrofagom.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Górala jest zogniskowana na zaprzęgnięciu splotowych sieci neuronowych do osiągnięcia zamierzonych w niej celów. Zastosowanie sieci neuronowych przynosi liczne korzyści w przemyśle, jak i w ogrodnictwie. Autor rozprawy niezwykle rzeczowo i przejrzyście przedstawił działanie, architekturę, dokonał ich przeglądu i wyboru najbardziej odpowiednich do zrealizowania zadań własnych. Realizacja tych zadań wymagała adaptacji splotowych sieci neuronowych, dotrenowania. Żeby to zrealizować

zostały przygotowane biblioteki własnych zdjęć. Rezultaty badań eksperymentalnych potwierdzają trafność wyboru sieci neuronowych, kryterium oceny była dokładność.

Wyniki badań przeprowadzonych w środowisku rzeczywistym, w sadzie, potwierdziły funkcjonalność modernizacji i sprawność działania ciągnika w trybie autonomicznym. To samo należy powiedzieć o działaniu opryskiwacza i sekcji opryskującej. Dzięki zastosowanemu algorytmowi wizyjnemu sterującemu opryskiwaczem Autor uzyskał oszczędność zużycia wody i w konsekwencji środków ochrony roślin wynoszącą 28% w skali całego sezonu, co jest bardzo dobrym wynikiem. Na tak dobry rezultat końcowy miały wpływ wyniki cząstkowe wynikające przede wszystkim z rozpoznawania wysokości drzew i w mniejszym stopniu z klasyfikacji stanu rozwojowego drzew. Na podkreślenie zasługuje także to, że oba wybrane przez Autora modele sieci neuronowej: Xception i NasNetLarge odznaczały się bardzo wysoką i podobną dokładnością wykrywania stanów rozwojowych drzew i chorób.

Zgadzam się z wnioskami przedstawionymi rozdziale 5. Pod tytułem „Wnioski końcowe i podsumowanie przeprowadzonych badań”, w tym z tym najważniejszym, że teza naukowa wysunięta we wprowadzeniu do rozprawy została w pełni dowiedziona. Pan mgr inż. Piotr Górski wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej na bardzo wysokim poziomie i opracował oryginalne dzieło naukowe.

#### ***Uwagi i kwestie dyskusyjne***

Pracę określam jako bardzo silną pod względem merytorycznym, ma bardzo mało słabych punktów. Zakładam, że dojście do wypracowania ostatecznie zaproponowanego rozwiązania problemu wiązało się z pokonaniem „momentów krytycznych” technologii i bardzo doceniam Autora za umiejętność przezwyciężenia przeciwności i zoptymalizowania systemu sztucznej inteligencji wspomagającego wykonywanie autonomicznych zabiegów opryskiwania w sadzie. Moim zdaniem rozprawa jest bardzo dobra, jednak mogłaby być jeszcze nieco lepsza gdyby wzbogaciła się o pewnego rodzaju dyskusję nad osiągniętym rozwiązaniem, nad wizją systemu w przyszłości, być może wystarczyłoby poszerzyć rozdział 5. poświęcony wnioskowi i podsumowaniu.

Praca została napisana w dobrym stylu, z użyciem języka typowego dla dyscypliny naukowej, w której jest procedowana. Autor nie ustrzegł się też pewnych potknięć terminologicznych i drobnych błędów językowych dotyczących pewnych sformułowań związanych generalnie z ogrodnictwem, nad kilkoma z nich warto pochylić się w przyszłych polskojęzycznych opracowaniach, należą do nich: infekcji drzew – powinno być raczej chorób (stanów chorobowych) drzew; oprysk – powinno być opryskiwanie; pojawienie się robaków w dojrzałych owocach – powinno być raczej larw, oprysk zostanie w pełni wchłonięty – powinno być raczej środek ochrony roślin (lub substancja) zostanie w pełni wchłonięty. W bibliografii dwukrotnie pojawia się pozycja 48. Inne drobne błędy, gramatyczne, interpunkcyjne, przestawienie słów, są niemal oczywiste w każdej pracy, w obecnie recenzowanej są bardzo rzadkie, dlatego nie będę na nie bezpośrednio wskazywał. Przedstawione powyżej kwestie nie umniejszają bardzo wysokiej wartości rozprawy doktorskiej przedłożonej mi do oceny.

#### 4. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę znaczenie tematyki badawczej i sposób rozwiązania problemu badawczego a także wysokie walory aplikacyjne rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Górala stwierdzam, że dzieło to prezentuje oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i potwierdza wysoki poziom ogólnej wiedzy teoretycznej oraz umiejętności Autora do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Praca doktorska spełnia zatem wymagania art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2024 r. poz. 124 i 227) i może stanowić podstawę o nadanie stopnia naukowego doktora w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Ponadto wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Górskiego stosowną nagrodą za zaprezentowanie w pełni kompleksowego i autonomicznego rozwiązania technologicznego dedykowanego do ochrony jabłoni przed parchem jabłoni i czereśni przed nasionnicą trześniówką, które w przytoczonych zastosowaniach przewyższa znacznie inne rozwiązania znane z praktyki i literatury naukowej łącząc odrębne ogniwa procesu konwencjonalnego zarządzania ochroną roślin w jeden modułarny i efektywnie działający system oparty na sztucznej inteligencji umożliwiający wykonywanie autonomicznych zabiegów opryskiwania w sadzie.

Z wyrazami szacunku,



Henryk Ratajkiewicz