mpl.

Warszawa, 12 października 2023 r.

Dr hab. inż. Tomasz Leś
Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych
Politechnika Warszawska
ul. Koszykowa 75 / GE 216
00-662 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Wachowicz **„Monitorowanie rodzin pszczelich z wykorzystaniem urządzeń IoT w celu wykrywania sytuacji zagrażających życiu pszczół"**

promotor rozprawy: dr hab. inż. Dariusz Mrozek

Obserwowany w ostatnich latach rozwój technik obrazowania i monitorowania stanu środowiska naturalnego wskazuje na znaczący potencjał ich zastosowań w różnych dziedzinach nauki. W kontekście pracy doktorskiej, która skupia się na problemie monitorowania rodzin pszczelich za pomocą technologii Internetu Rzeczy (IoT), można zauważyć, że jest to zagadnienie o dużym znaczeniu społecznym i naukowym. Autorka wskazuje na kluczowe wyzwania w ekologii, takie jak depopulacja pszczół, podkreślając tym samym znaczenie i aktualność tematu. Jest to problem, który dotyczy zarówno naukowców, jak i pszczelarzy czy nawet producentów żywności.

Zaproponowane w pracy rozwiązania, w tym inteligentne systemy monitorujące, mają potencjał do istotnego przyczynienia się do rozwoju nauki i technologii w tej dziedzinie. Nie tylko wskazują na luki w obecnej literaturze, ale również otwierają nowe możliwości dla ich praktycznej implementacji w rzeczywistości. Jest to szczególnie ważne w dobie globalnych wyzwań, takich jak kryzys klimatyczny czy zagrożenia dla różnorodności biologicznej.

Cel rozprawy został sformułowany w sposób jednoznaczny i konkretny. Autorka zaprojektowała i zaimplementowała system Internetu Rzeczy (IoT) dedykowany do monitorowania rodzin pszczelich w kontekście wykrywania potencjalnie niebezpiecznych sytuacji, takich jak obecność dręcza pszczelego. To jest zasadniczy problem, który rozprawa ma za zadanie rozwiązać.

Teza rozprawy jest jasno sformułowana: doktorantka twierdzi, że wykrycie dręcza pszczelego w czasie rzeczywistym jest możliwe za pomocą urządzenia IoT wyposażonego w kamerę i korzystającego z modelu przetwarzania brzegowego. Jest to teza ambitna, ale jednocześnie realna w kontekście obecnych możliwości technologicznych. Teza ta wymaga zastosowania zaawansowanych technik przetwarzania obrazów i analizy danych w czasie rzeczywistym.

Co więcej, autorka zdefiniowała konkretne wymagania, które muszą być spełnione, aby cel i teza zostały zrealizowane. Pierwsze z nich, dotyczące minimalizacji zakłóceń dla pszczół i ich środowiska, jest kluczowe z punktu widzenia etyczności i zrównoważonego rozwoju. Kolejne wymagania dotyczą technicznych aspektów systemu, takich jak uwzględnienie różnych poziomów oświetlenia, efektywność czasowa przetwarzania i jakość obrazu.

Podsumowując, cel rozprawy został sformułowany w sposób jednoznaczny i precyzyjny, a teza jest ambitna i jednocześnie realistyczna.

Rozdział 2 omawianej pracy składa się z dwóch głównych części. Pierwsza sekcja koncentruje się na problematyce pszczelarstwa, z naciskiem na kryzys masowego ginięcia pszczół. Autorka zaczyna od wprowadzenia w kontekst pszczelarstwa jako kluczowego elementu rolnictwa i ekosystemów, omawia jego historyczne korzenie i ewolucję. Analizuje również wpływ jednego z najbardziej destrukcyjnych pasożytów pszczół, dręcza pszczelego na zdrowie populacyjne pszczół.

Druga sekcja rozdziału skupia się na zagadnieniu Przemysłu 4.0, stanowiącego przełom w sposobie, w jaki technologie są stosowane w produkcji. Doktorantka analizuje kluczowe komponenty tego zjawiska, takie jak Internet Rzeczy (IoT), systemy cyber-fizyczne (CPS), a także nowoczesne technologie, takie jak sztuczna inteligencja i uczenie maszynowe. Jako odpowiedź na wyzwania związane z przetwarzaniem dużych ilości danych w czasie rzeczywistym, autorka wprowadza koncepcję przetwarzania brzegowego.

W rozdziale 3 doktorantka koncentruje się na ewolucji sposobów monitorowania pszczół, od tradycyjnych do nowoczesnych, i podkreśla rosnący wpływ technologii w pszczelarstwie. Rozdział podkreśla również znaczenie zastosowania nowoczesnych technologii, takich jak mikroprocesory, sensory i algorytmy uczenia maszynowego, w monitorowaniu pszczół. Nowoczesne systemy są zdolne do zbierania i analizy dużych ilości danych na temat uli i rodzin pszczelich, co może prowadzić do znaczących usprawnień w zarządzaniu pasieką. Technologie te są również kluczowe dla rozwoju precyzyjnego pszczelarstwa, nowego podejścia, które korzysta z analizy danych do optymalizacji praktyk pszczelarskich. Metody monitorowania są różne i można je klasyfikować na kilka sposobów: przez rodzaj przetwarzanych danych (temperatura, waga, obraz, dźwięk itd.) oraz przez sposób ich przetwarzania.

Rozdział 3.2.2. omawia rozwiązania w dziedzinie pszczelarstwa precyzyjnego i klasyfikuje je pod kątem różnych aspektów ich funkcjonowania. Pierwszym z tych aspektów jest jednostka wykonująca obliczenia. Tu zauważalny jest wyraźny trend zmiany z komputerów PC na mikrokontrolery, z dominującą rolą płyt Raspberry Pi na czele. Mikrokontrolery ATmega i Arduino są stosowane znacznie rzadziej.

Drugim istotnym elementem są zastosowane algorytmy. W tym kontekście warto podkreślić, że zarówno w starszych, jak i nowszych systemach często wykorzystywana jest maszyna wektorów nośnych (SVM). W nowszych rozwiązaniach coraz częściej pojawiają się też sieci neuronowe, co świadczy o rosnącej roli uczenia maszynowego w analizie danych w pszczelarstwie.

Kolejnym aspektem są protokoły komunikacyjne. Zauważalna jest tutaj ewolucja od połączeń fizycznych (kable) do transmisji bezprzewodowej. Dominują tu nowoczesne protokoły takie jak Zigbee, LoRaWAN i WiFi, które umożliwiają efektywną i elastyczną komunikację między różnymi elementami systemu.

Ostatnie dwa elementy to sposób pozyskiwania i przechowywania danych. W tym kontekście większość systemów korzysta z danych pozyskiwanych w ramach własnych obserwacji. Tylko nieliczne systemy

korzystają z gotowych baz danych. Co do przechowywania danych, tu również zauważalny jest postęp technologiczny: od lokalnych baz danych do chmur obliczeniowych i serwerów zdalnych.

Tabela, która jest częścią rozdziału, skupia się na konkretnych aspektach analizowanych systemów i rozwiązań: rodzaju danych, celu ich przetwarzania, sposobie pozyskiwania i przechowywania danych, jednostce obliczeniowej, sposobie transmisji danych oraz używanych algorytmach. Dzięki takiemu zestawieniu, czytelnik może szybko zorientować się w kluczowych różnicach i podobieństwach między poszczególnymi rozwiązaniami. Jednak taki sposób prezentacji literatury ma pewne ograniczenia. Po pierwsze, skupia się głównie na aspektach technicznych, pomijając kontekst teoretyczny, na którym opierają się analizowane rozwiązania. Brakuje informacji o tym, jakie teorie czy modele matematyczne zastosowano w analizowanych systemach. Po drugie, tabela nie dostarcza informacji o jakości wykonanych badań, ich ograniczeniach czy też o tym, jakie konkretnie wyniki udało się uzyskać. Brakuje również informacji o ewentualnych rekomendacjach czy sugestiach dla przyszłych badań w tej dziedzinie.

Rozdział 4 skupia się na zastosowaniu Internetu Rzeczy i technik głębokiego uczenia maszynowego w kontekście wykrywania dręcza pszczelego na ciele pszczoły. W podrozdziale 4.1.1 skupiono się na wykorzystaniu platformy RaspberryPi z akceleratorem USB Google Coral, gdzie szczegółowo opisano architekturę systemu, zastosowane algorytmy i modele uczenia maszynowego. System ten korzysta z chmury Amazon AWS i używa różnych usług tej platformy do komunikacji i przechowywania danych. Użyto miar jakościowych takich jak precyzja, czułość i miara F1 do oceny jakości detekcji.

W podrozdziale 4.1.2 opisano alternatywną implementację na platformie NVidia Jetson Nano. System ten również korzysta z chmury AWS, ale ma różnice w architekturze i zastosowanych technologiach. Tu również używane są konwolucyjne sieci neuronowe i różne metody detekcji obiektów.

W kolejnych podrozdziałach prezentowany jest kompleksowy opis systemu Internetu Rzeczy (IoT) służącego do monitorowania i klasyfikacji pszczół z uwzględnieniem detekcji dręcza pszczelego. Autorka szczegółowo omawia architekturę i działanie urządzenia brzegowego opartego na komputerze NVidia Jetson Nano. Opisuje jego specyfikacje, zdolności przetwarzania obrazów i uczenia maszynowego. Zintegrowana z tym systemem kamera IMX219 jest dedykowana dla aplikacji korzystających ze sztucznej inteligencji i umożliwia pozyskiwanie obrazów w wysokiej jakości w różnych warunkach atmosferycznych. Opisane są również aspekty sieciowe, w tym zastosowanie karty sieciowej TP-Link TL-WN725N oraz oprogramowanie systemu. Jest ono oparte na języku Python i korzysta z biblioteki Tensorflow oraz usług Amazon AWS. Autorka przedstawia algorytm działania systemu, który reguluje, jak obrazy są pozyskiwane, analizowane i klasyfikowane. W przypadku wykrycia dręcza pszczelego, system łączy się z chmurą Amazon AWS i uruchamia szereg usług, w tym powiadamianie pszczelarza. Dalej, rozdział koncentruje się na analizie i wyborze modelu sieci neuronowej, ze szczególnym uwzględnieniem modelu MobileNetV2 Lite opartego na metodzie Single Shot Detector. Został on wybrany ze względu na jego zdolność do szybkiego przetwarzania obrazów i mniejsze wymagania pamięciowe. Autorka dokonuje analizy porównawczej różnych modeli sieci neuronowych i umieszcza matematyczną analizę ilości pamięci potrzebnej do wnioskowania na grafie obliczeniowym.

Podrozdział (4.4.1) opisuje algorytm adaptacyjnego wyznaczania okna zagęszczenia, który pozwala na identyfikację obszarów, na których występuje największe zagęszczenie pszczół. Używane są tu techniki znane z haszowania przestrzennego i map cieplnych. Podrozdział (4.4.2) koncentruje się na właściwej detekcji pszczół na klatkach filmowych. Opisuje inicjalizację zmiennych, działanie modelu sieci neuronowej do detekcji pszczół i sposób przetwarzania klatek. Trzeci podrozdział (4.4.3) omawia proces detekcji dręcza

pszczelego na ciele pszczoły, który również korzysta z modelu uczenia maszynowego. Ostatni podrozdział (4.5) prezentuje metryki i miary, które są używane do oceny skuteczności modeli. Wszystkie te fazy są ściśle powiązane i tworzą kompleksowy system do monitorowania i analizy zachowań pszczół.

W rozdziale 5 najpierw autorka opisuje detale dotyczące gromadzenia i przygotowania danych wykorzystanych w badaniu. Doktorantka korzysta tu z wyników wstępnych badań, aby zminimalizować czas przetwarzania danych i jednocześnie zachować ich jakość. Interesującą kwestią jest sposób przygotowania danych dotyczących "chorych" pszczół. Z uwagi na brak naturalnych nagrań, autorka zdecydowała się na wykorzystanie ręcznej manipulacji obrazami. Sekcja dotycząca augmentacji danych pokazuje świadomość autorki co do ograniczeń zestawu danych i próbuje te ograniczenia zminimalizować przez zastosowanie technik zwiększenia jego objętości i różnorodności.

Nastepnie w podrodziale 5.2 doktorantka przedstawia szczegółowy opis procesu detekcji pszczół wykorzystującego model SSD MobileNet V2 Lite. Model ma za zadanie klasyfikować pszczoły na zdrowe i chore, a obrazy wejściowe są zeskalowane do rozmiaru 320x320 pikseli. Do treningu modelu wykorzystano 75 obrazów, a do testowania kolejne 25, na których zaznaczono łącznie 360 obiektów pszczół. Proces uczenia modelu został przeprowadzony dwukrotnie: raz dla 3000 epok, a raz dla 4000. Zastosowanie większej liczby epok prowadziło do lepszych wyników w kontekście różnych metryk jakości (dokładność, precyzja, czułość, miara F1). Model trenowany przez 4000 epok (zwłaszcza z parametrem IoU $\geq$ 0.5) wykazywał najbardziej obiecujące wyniki.

Jest to materiał, który z pewnością stanowi cenny wkład w dziedzinę detekcji i klasyfikacji obiektów w kontekście pszczelarstwa. Metodyczne podejście do problemu i dbałość sprawia, że przedstawione wyniki są wiarygodne i mogą być podstawą dla dalszych badań. Jednakże, warto by było zastanowić się nad dodatkowym zbadaniem wpływu różnych architektur modeli oraz innych metod augmentacji danych na wyniki klasyfikacji. To mogłoby prowadzić do szerszych konkluzji i potencjalnie prowadzić do jeszcze lepszych wyników.

Następnie pani Anna Wachowicz skupia się na kluczowym etapie badań, którym jest detekcja dręcza pszczelego i klasyfikacja pszczół. Wykorzystuje ona model 4k05, wcześniej uznany za najbardziej optymalny w procesie detekcji pszczół. Zbiór składa się z 950 zdjęć, w tym 64 zdjęć chorych pszczół i 886 zdrowych. Zbiór jest podzielony i zwielokrotniony, a następnie poddany augmentacji, co prowadzi do finalnej liczby 6050 obrazów.

Co warto podkreślić, model wykazał wysoką czułość na poziomie 99%, co oznacza, że prawie wszystkie chore pszczoły zostały prawidłowo zidentyfikowane. Niemniej jednak, autorka zwraca uwagę na pewne niedociągnięcia, w tym 12% fałszywie pozytywnych wyników, co może prowadzić do niepotrzebnych alarmów dla pszczelarza co stanowi pole do dalszych usprawnień. Możliwą drogą naprawy mogłoby być zastosowanie dodatkowych technik regularyzacji czy też bardziej zaawansowanych technik augmentacji danych. Mimo tych niedociągnięć, badanie stanowi cenny wkład w dziedzinę automatycznej diagnostyki w pszczelarstwie.

W rozdziale 5.4 Anna Wachowicz skupia się na algorytmie adaptacyjnym wyznaczania okna zagęszczenia w kontekście analizy klatek filmowych prezentujących pszczoły. Zasadniczym celem tego algorytmu jest ograniczenie analizowanego obszaru tak, aby skupić się na tych fragmentach klatek, na których rzeczywiście znajdują się pszczoły. Jest to istotne dla efektywności przetwarzania i analizy danych. Algorytm ten został przetestowany na pięciu różnych filmach, reprezentujących różnorodne warunki, w tym różne

poziomy zagęszczenia pszczół.Badania zostały uzupełnione licznymi tabelami i rysunkami, które ilustrują różne aspekty i wyniki algorytmu.

Jest również ciekawy moment, w którym doktorantka porusza kwestię "rozgrzewki" procesora (ang. warmup), co jest istotne w kontekście środowiska TensorFlow RT. To wskazuje na głębokie zrozumienie niuansów implementacyjnych i ich wpływ na wyniki czasowe.

W sekcji 5.6, autorka porównuje swoje wyniki z wcześniejszymi badaniami, co jest istotne dla zrozumienia, jak jej prace wpisują się w kontekst naukowy i praktyczny.

Jednym z aspektów, który mógłby być dodatkowo rozwinięty, jest analiza wpływu różnych parametrów systemu na wydajność, jak na przykład wpływ różnych modeli uczenia maszynowego na czas detekcji pszczół.

W sumie, praca Anny Wachowicz stanowi solidną podstawę dla dalszych badań w dziedzinie detekcji zagrożeń dla pszczół w kontekście IoT. Jej podejście jest metodyczne i dobrze udokumentowane, co sprawia, że jest to wartościowy wkład w literaturę naukową.

Znaczący jest również aspekt współpracy z pszczelarzami, którzy byli zaangażowani we wszystkie etapy badań. Dzięki temu system jest nie tylko technologicznie zaawansowany, ale również dostosowany do rzeczywistych potrzeb i wymagań użytkowników.

Wszystko to sprawia, że przedstawiona rozprawa jest znaczącym wkładem w rozwój nowoczesnych technologii w pszczelarstwie, a jej wyniki mają realny wpływ na praktykę pszczelarską. Warto podkreślić, że autorka nie tylko zidentyfikowała i rozwiązała istotny problem, ale również otworzyła szerokie pole dla dalszych badań i implementacji.

Podsumowując merytoryczną ocenę rozprawy stwierdzam, że lokuje się ona w dyscyplinie informatyka. Doktorantka wykazała się przy tym szeroką wiedzą teoretyczną z dziedziny informatyki dotyczącą komputerowych metod przetwarzania i analizy obrazów a także umiejętnością planowania i realizacji badań naukowych. Moim zdaniem cele pracy zostały w pełni osiągnięte, zaś do najważniejszych osiągnięć doktorantki zaliczam autorski algorytm adaptacyjnego wyznaczania okna zagęszczenia: autorka wprowadziła nowatorski algorytm, który optymalizuje działanie systemu w czasie rzeczywistym. Jest to kluczowe osiągnięcie, które nie tylko zwiększa efektywność wykrywania zagrożeń, ale również wpływa na oszczędność zasobów sprzętowych.

W ramach uwag dyskusyjnych i polemicznych chciałbym poruszyć następujące zagadnienia:

1. Skalowalność systemu: Chociaż autorka dokładnie opisuje działanie i efektywność systemu na jednym ulu, pozostaje pytanie, jak system będzie działał w skali większej, np. w dużych pasiekach z dziesiątkami uli. W tym kontekście, analiza złożoności obliczeniowej oraz zasobów sprzętowych potrzebnych do skalowania systemu byłaby wartościowym dodatkiem.

2. Odporność na warunki zewnętrzne: Praca nie rozważa w pełni wpływu warunków środowiskowych (takich jak temperatura, wilgotność czy różne poziomy oświetlenia w ciągu dnia) na efektywność systemu. Te aspekty mogą mieć znaczący wpływ na działanie sensorów i algorytmów, i ich analiza mogłaby wzbogacić rozprawę.

3. Kompatybilność z istniejącymi systemami: Autorka nie omawia, jak jej system IoT mógłby być zintegrowany z istniejącymi systemami zarządzania pasieką czy też systemami monitorowania warunków atmosferycznych, co mógłby być cennym dodatkiem do jej rozprawy.

4. Analiza kosztów: W rozprawie brakuje również analizy kosztów związanych z implementacją i utrzymaniem proponowanego systemu. Taka analiza byłaby szczególnie użyteczna dla pszczelarzy, którzy są głównymi beneficjentami tego badania.

5. Wybór Techniki Single Shot Detector: Autorka zastosowała technikę Single Shot Detector (SSD) w swoim modelu, ale nie dostarcza wyraźnego uzasadnienia dla tego wyboru. Wyjaśnienie, dlaczego ta konkretna technika została wybrana w kontekście problemu wykrywania dręcza pszczelego, mogłoby wzbogacić merytoryczną wartość rozprawy.

6. Opis Literatury na Stronie 41: Wydaje się, że sekcja poświęcona przeglądowi literatury na stronie 41 mogłaby być bardziej wnikliwa.

7. Strona 49, rozdział 4.1: mógłby zawierać bardziej szczegółowy opis wkładu autorki w prace, które są omawiane.

8. Strona 57: Autorka opisuje, że wiadomość jest przesyłana na serwer w momencie wykrycia pszczoły. Pozostaje jednak otwarte pytanie, jak zorganizowane jest przesyłanie tych wiadomości, aby unikać duplikatów czy zbyt dużej liczby wiadomości, które mogą obciążyć serwer.

Praca pod względem redakcyjnym jest przygotowana starannie, znalazłem tylko kilka błędów redakcyjnych:

1. Strona 58: Niepotrzebne podkreślenie wybranych wyrazów na rysunku 14 i niepotrzebna przerwa pomiędzy akapitami.

2. Strona 50 "Ogólna architektura urządzenia systemu IoT wykorzystywanymi usługami..." brakuje litery „z".

Wszystkie moje uwagi krytyczne i dyskusyjne w żadnym stopniu nie wpływają na jednoznacznie pozytywną ocenę recenzowanej pracy. Stwierdzam, że praca „Monitorowanie rodzin pszczelich z wykorzystaniem urządzeń IoT w celu wykrywania sytuacji zagrażających życiu pszczół" w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz wnioskuję o przyjęcie tej rozprawy i dopuszczenie mgr inż. Annę Wachowicz do publicznej obrony.