Poznań, 18.12.2023 r.

Dr hab. inż. Wojciech Giernacki, prof. PP
Instytut Robotyki i Inteligencji Maszynowej
Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań
wojciech.giernacki@put.poznan.pl

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgra inż. Krzysztofa Smykały
pod tytułem

„Zastosowanie metod uczenia maszynowego i pomiarów hiperspektralnych w diagnostyce uprawy *Solanum lycopersicum*"

opracowana na zlecenie

Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Opolskiej

1. Problem naukowy i obszar tematyczny rozprawy

W recenzowanej rozprawie doktorskiej podjęty problem naukowy został nakreślony wokół opracowania skutecznej metody przetwarzania i klasyfikacji danych hiperspektralnych w celu automatyzacji procesu wczesnej, nieinwazyjnej diagnostyki chorób roślin, a dokładniej – dwóch odmian *Solanum lycopersicum* (pomidora zwyczajnego), tj. *Benito* i *Polfast*, pod kątem klasyfikacji na bazie uczenia maszynowego do pięciu różnych jednostek chorobowych (zarażenia patogenem *Colletotrichum coccodes* powodującym antraknozę, *Alternaria solani* powodującym alternariozę, *Phytophthora infestans* powodującym zarazę ziemniaka w uprawach pomidora, *Pseudomodonas syringe pv. Tomato* powodującym bakteryjną cętkowatość oraz *Septoria lycopersici* powodującym septoriozę). Autor rozprawy postanawiając wnieść kontrybucję w dynamicznie rozwijający się obszar rolnictwa precyzyjnego postawił na badania interdyscyplinarne oparte na nowoczesnych technikach pomiarowych, przetwarzaniu danych sensorycznych, rozwoju sieci neuronowych, statystyce opisowej, jak również biologii roślin.

Wzrost zaludnienia naszej planety, kryzysy migracyjne, konflikty zbrojne czy okres pandemii COVID-19 uwidaczniają realne braki żywności i jej rosnące ceny. Problemy te uświadamiają, jak ważne stają się interdyscyplinarne badania naukowe, w rezultacie których powstają innowacyjne metody zwiększenia efektywności upraw. Badania w dziedzinach nauk inżynieryjno-technicznych, w obszarze wzrostu produktywności rolniczej prowadzone są obecnie w kierunku opracowywania nowych nawozów i środków ochrony roślin, nowoczesnych maszyn rolniczych (załogowych i bezzałogowych), jak również

nad metodami automatycznego przetwarzania danych sensorycznych i obrazowych do wczesnej i skutecznej detekcji jednostek chorobowych, które niewykryte (lub wykryte zbyt późno) potrafią dziesiątkować plony. Szczególnie podatny na choroby i ich szybkie rozprzestrzenianie jest pomidor zwyczajny, któremu poświęcono uwagę badawczą w recenzowanej rozprawie, a który to jest jednym z najpowszechniej uprawianych warzyw na świecie. Z perspektywy nowoczesnej robotyki, w ostatnich latach w literaturze przedmiotu obserwuje się silny trend badawczy w obszarze automatycznej analizy danych obrazowych (zdjęć roślin), jak i użycia pomiarów multi- i hiperspektralnych do bieżącej oceny jakości uprawy pomidorów oraz predykcji ich wzrostu i przeciwdziałaniu chorobom. W badaniach tych czas wykrycia i klasyfikacji jednostek chorobowych jest kluczowy. Wyróżnia się szereg podejść – od użycia danych pomiarowych rejestrowanych z wysokiego pułapu (obrazowanie satelitarne z użyciem satelit geostacjonarnych, np. Sentinel), poprzez wykorzystanie możliwości współczesnych, bezzałogowych statków powietrznych (konstrukcje stałopłatowe i wielowirnikowe wyposażone w sensory multi- i hiperspektralne), do zastosowania naziemnych robotów mobilnych jako platform pomiarowych czy użycia hiperspektralnych sensorów ręcznych do pomiaru reflektancji włącznie. Prowadzone są również eksperymenty laboratoryjne pozwalające na utrzymanie stałych, referencyjnych warunków w badaniach porównawczych i statystycznych. W przedstawionej do recenzji rozprawie te ostatnie mają kluczowe znaczenie, ponieważ niezależnie od warunków pogodowych (sezon upraw pomidora na polach w Polsce jest krótki), możliwe jest przygotowanie danych do uczenia sieci neuronowych i co szczególnie istotne – przygotowana próbek z wywołanymi jednostkami chorobowymi, dla których skuteczność metod detekcji i klasyfikacji chorobowej można następnie walidować w drodze badań in situ (już na polach uprawnych). Do opracowania omawianej w dalszej części metody posłużyły przede wszystkim dane pomiarowe pozyskane w drodze projektu badawczego z funduszy Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (POIR.01.01.01-00-1217/17) realizowanych przez Doktoranta z firmą QZ Solutions Sp. z o.o. przy współpracy z Wydziałem Ogrodnictwa i Warzywnictwa Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu oraz Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk. Jest to w mojej ocenie bardzo wartościowy materiał badawczy, a współpraca Doktoranta z ww. jednostkami i połączenie kompetencji naukowych z różnych dyscyplin budzi moje uznanie.

Celem przedstawionej do recenzji rozprawy było udowodnienie następującej, tezy:

Istnieje możliwość wykorzystania pomiarów hiperspektralnych reflektancji z zakresu fal o długości 350-2500 nm i algorytmów uczenia maszynowego w procesie automatycznej diagnostyki Solanum lycopersicum dla potrzeb klasyfikacji wybranych jednostek chorobowych.

Przytoczoną powyżej tezę Autor rozprawy uzupełnia trzema tezami pomocniczymi:

- Możliwe jest określenie algorytmów klasyfikacyjnych, które z większą efektywnością pozwalają na rozpoznanie następujących chorób pomidora zwyczajnego: alternarioza, antraknoza, bakteryjna cętkowatość pomidora, septorioza, zaraza ziemniaka w pomidorze z zastosowaniem ograniczonego zbioru danych uczących,
- Możliwe jest określenie specyficznych długości zakresu widma odpowiadających określonym jednostkom chorobowym *Solanum lycopersicum*,
- Hiperspektralne pomiary reflektancji pozwalają na klasyfikację jednostek chorobowych *Solanum lycopersicum* w czasie szybszym niż metoda oceny wizualnej stosowana w praktyce.

2. Forma i kompozycja rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska została napisana w języku polskim, liczy wraz z załącznikiem 150 stron i składa się z 14 rozdziałów poprzedzonych *Spisem treści* oraz *Wykazem najważniejszych oznaczeń i skrótów* ujętym w formę tabelaryczną. Rozprawa zawiera 102 rysunki, 25 tabel oraz odnośniki do 103 pozycji literaturowych, wśród których znajdują się trzy współautorskie publikacje mgra K. Smykały z lat 2020-2023. W jednej z nich wymieniony został on jako pierwszy autor, a najnowsza z przywołanych publikacji została opublikowana w wysokopunktowanym czasopiśmie Scientific Reports, IF 4.6 (2022), 140 pkt. Do treści rozprawy załączono upoważnienie z firmy QZSolutions dla Doktoranta do wykorzystania danych firmowych w celu realizacji prac naukowo-badawczych z dnia 09.02.2021 roku.

Rozdział 1 to wprowadzenie w tematykę rozprawy. Autor nakreśla w nim potrzeby i obecnie stosowane rozwiązania w zakresie automatycznej detekcji i klasyfikacji jednostek chorobowych roślin.

W **Rozdziale 2** Autor streszcza zawartość kolejnych rozdziałów rozprawy. Stawia również formalnie tezę główną i tezy pomocnicze rozprawy.

Rozdział 3 to przybliżenie stanu wiedzy w zakresie biologii upraw i chorób pomidora zwyczajnego. Autor przywołuje publikacje traktujące o metodach rozpoznawania chorób. Klasyfikuje następnie poszczególne jednostki chorobowe oraz patogeny je wywołujące. Posługuje się przy tym bogatym materiałem zdjęć referencyjnych chorych roślin dla ich lepszego zobrazowania. Należy docenić podjęty trud Autora, aby skomplikowane i dalekie robotyce aspekty biologiczne chorób w uprawach *Solanum lycopersicum* przedstawić w sposób prosty, a jednocześnie wyczerpujący dla celów dalszego zrozumienia opracowanej autorskiej metody ich detekcji i klasyfikacji. W dalszej części rozdziału Autor charakteryzuje nieinwazyjne podejścia stosowane obecnie w diagnostyce chorób roślin na podstawie analizy obrazów w przestrzeni barwnej RGB oraz danych wielo- i hiperspektralnych. W mojej ocenie to jeden z najsłabszych fragmentów rozprawy. Autor referuje do olbrzymiej liczby publikacji naukowych (tylko na stronie 17 doliczyłem się 203 wskazań literaturowych), natomiast analiza state-of-the-art jest przeprowadzona bardzo pobieżnie.

W **Rozdziale 4** Autor dokonuje klasyfikacji różnych typów danych spektralnych wykorzystywanych w nieinwazyjnych metodach diagnostycznych. Omawia szczególnie te zakresy spektralne, które zostały użyte w jego badaniach. W odróżnieniu od rozdziału poprzedniego, tutaj wraz z odpowiednimi referencjami został przedstawiony wyczerpująco aktualny stan wiedzy w zakresie metod łączących zalety danych hiperspektralnych i uczenia maszynowego w celu szybkiej, wczesnej analizy danych pod kątem przyporządkowania zakażonego danym patogenem *Solanum lycopersicum* do odpowiedniej jednostki chorobowej, co w diagnostyce upraw pomidora jest kluczowe. Dobrym konceptem są drobiazgowe zestawienia porównawcze skuteczności dotychczas opracowanych metod pod kątem istotnych zakresów spektralnych do których Autor referuje wynikami w rozprawie. Wyznacza to poziom aspiracji naukowych Doktoranta, tj. oczekiwany czas potrzebny na automatyczną diagnostykę oraz skuteczność autorskiej metody.

Rozdział 5 to zaledwie trzy strony przedstawiające koncepcję metody diagnostyki wybranych chorób w uprawie pomidorów zwyczajnych. Zdziwienie recenzenta budzi poziom ogólnikowości, jak i zamieszczony rysunek 12, na którym proponowany jest system oparty na wykorzystaniu drona, gdzie w rozprawie uwaga Autora jest skoncentrowana na badaniach laboratoryjnych.

Rozdział 6 stanowi opis przyjętej metodologii badań – szczególnie eksperymentów pomiarowych. Autor szczegółowo raportuje kolejne czynności badawcze w ramach nakreślonego harmonogramu badań, opisuje proces przygotowania materiału roślinnego do badań i inokulacji oraz charakteryzuje

stanowisko badawcze do pomiarów hiperspektralnych z użytym instrumentem pomiarowym w kontekście przeprowadzonych eksperymentów.

Rozdział 7 to opis klasyfikatorów użytych do opracowania autorskiej metody uczenia maszynowego. Spośród kilkudziesięciu wstępnie wyselekcjonowanych klasyfikatorów Autor z uwagi na wysoką skuteczność wyselekcjonował następnie sześć przedstawionych szczegółowo w rozprawie.

Rozdziały 8-10 zawierają oryginalne wyniki z przeprowadzonych prac badawczych Autora. Zaprezentowana została metoda postępowania z danymi hiperspektralnymi w celu uzyskania największej skuteczności wybranych klasyfikatorów. Autor raportuje m.in. akwizycję pomiarów hiperspektralnych, filtrację i wstępne przetwarzanie danych, wyodrębnienie zbioru treningowego i metadanych. Omawia metodę łączenia danych z uwzględnieniem wymiaru czasu rozumianego jako DPI (liczba dni po inokulacji). Charakteryzuje analizę zbioru danych (podział klasowy) pod kątem przynależności do konkretnej jednostki chorobowej. Analizuje następnie jakościowo pomiary za pomocą wskaźnika wegetacyjnego NDVI. Dowodzi również, że wybrane pasma spektralne są szczególnie istotne w szybkiej diagnostyce stanu chorobowego roślin. W oparciu o zaproponowaną metodę wstępnej selekcji 6 klasyfikatorów przedstawa także sposób eliminacji oraz wyznacza zakresy spektralne najczęściej biorące udział w procesie decyzyjnym dla różnych przypadków badawczych. W Rozdziale 10 wykazuje możliwość diagnostyki badanych chorób w okresie krótszym niż 7 dni od zakażenia, gdzie podział zbioru uczącego nastąpił w zależności od DPI.

W **Rozdziale 11** Autor podsumowuje osiągnięcia uzyskane w ramach badań, przedstawia najważniejsze wnioski oraz przytacza wyniki prezentowane w poszczególnych rozdziałach na potwierdzenie postawionych w rozprawie tez.

W półstronicowym **Rozdziale 12** Autor wyznacza jedynie bardzo enigmatycznie kierunki dalszych prac. **Rozdział 13** to wykaz 103 cytowanych w rozprawie pozycji bibliograficznych odzwierciedlających obecny stan wiedzy, a **Rozdział 14** stanowi dodatek do rozprawy z załącznikami (z wynikami klasyfikacji binarnej oraz dziennikiem eksperymentów).

3. Merytoryczna ocena rozprawy

3.1 Ogólna ocena rozprawy i znaczenie poznawcze

O ile w mojej opinii teza główna i dwie pierwsze tezy pomocnicze rozprawy zostały nakreślone dość zachowawczo i bezpiecznie w kontekście obecnego stanu wiedzy, to już trzecia z tez pomocniczych, którą Autor wykazał została postawiona bardzo ambitnie i tak, aby ocena osiągnięcia nie budziła żadnych wątpliwości, tj. aby wnieść niezaprzeczalny wkład w rozwój wiedzy poprzez propozycję takiej metody, która przy wysokim poziomie skuteczności przyczyni się do skrócenia obecnego czasu oceny jednostek chorobowych *Solanum lycopersicum* w praktyce. Aspekt praktyczny metody jest bardzo pożądany w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, tj. aby wysokie walory zaproponowanego podejścia naukowego, z uwagi na uzyskaną skuteczność, mogły znaleźć zastosowanie powszechne.

Za Autorem, do jego najważniejszych osiągnięć uzyskanych w ramach przedstawionych badań zaliczam:

- Opracowanie metody pozwalającej na wykrywanie chorób *Solanum lycopersicum* na podstawie danych hiperspektralnych,
- Opracowanie metody wstępnego przetwarzania danych hiperspektralnych na potrzeby diagnostyczne roślin charakteryzującej się poprawą wyników klasyfikacji na wysokim poziomie,

- Opracowanie metody tworzenia podzbiorów danych hiperspektralnych w celu uwzględnienia wymiaru czasu (DPI) w procesie treningu klasyfikatorów,
- Zaprojektowanie i implementacja wieloetapowego procesu treningu klasyfikatorów, w tym z uwzględnieniem wymiaru czasowego posiadanych danych,
- Wyznaczenie klasyfikatorów najlepiej sprawdzających się w procesie klasyfikacji binarnej,
- Wyznaczenie zakresów spektralnych w przestrzeni VNIR (ang. *Very-Near Infrared*) oraz SWIR (ang. *Short-wave infrared*) istotnych w klasyfikacji chorób roślin.

Rozprawa posiada szereg walorów poznawczych, zarówno teoretycznych, jak i praktycznych. Uważam, że przedstawione w niej wyniki zostały udokumentowane wyczerpująco. Zadania badawcze zostały nakreślone jasno i są innowacyjne, a postawione w rozprawie tezy – oryginalne wobec aktualnego stanu wiedzy, zostały udowodnione poprawnie.

3.2 Uwagi krytyczne

W trakcie lektury rozprawy nasunęło mi się kilka refleksji, wątpliwości i pytań:

- Strona 7_{16}-7_{23}: we fragmencie tym jako osiągnięcie techniki Autor przywołuje bardzo ogólnie systemy teledetekcyjne umożliwiające obserwację rozwoju wegetacyjnego uprawy z kosmosu z kilkudniową rozdzielczością czasową. Czy Autor uważa, że taki interwał pozyskanych danych byłby krytyczny dla codziennej oceny stanu wegetacji pomidora? Jaki jest state-of-the-art w końcu roku 2023 w tym zakresie mając na uwadze obecne możliwości projektów Copernicus czy AgroRadar, gdzie choćby satelity Sentinel 1 i 2, dostarczają odpowiednio całodobowego obrazowania radarowego i optycznego?
- Strona 7_{24}-7_{33}: w tym fragmencie rozprawy pojawiają się nieprecyzyjne określenia: „diagnozowanie chorób roślin z dużą dokładnością za pomocą danych satelitarnych" czy „Obrazowanie hiperspektralne pozwala na badanie obiektów z wyższą, o rząd wielkością spektralną niż w przypadku obrazowania multispektralnego", gdzie brakuje danych (lub odnośnika literaturowego) nt. skuteczności obrazowania multispektralnego.
- Strona 12_3: Autor wyszczególnia, że obiektem badań był pomidor zwyczajny w dwóch odmianach (Benito oraz Polfast), po czym stronę dalej (13_1) pisze o wykorzystaniu w badaniach wyników pomiarów hiperspektralnych dla czterech odmian tegoż pomidora zwyczajnego (Benito, Polfast, Dyno oraz Guadivia). Dalsze wyniki (np. Tabela 8, str. 56) i kolejne rozdziały rozprawy ograniczone są już do dwóch odmian. Co z pozostałymi?
- Strona 17_{14}-17_{14}: „Często badanym zakresem spektralnym był zakres 350-2500 nm [23, 27, 29-33, 38, 39, 42, 46, 48, 54-57, 60, 61, 64, 66, 68, 70-72]. Badana była również możliwość określania chorób na bazie indeksów spektralnych [23, 27, 30, 46, 55]." Co w zamyśle Autora miało na celu tylko wyszczególnienie tutaj publikacji bez ich wnikliwej analizy? Na stronie 17 doliczyłem się łącznie 203 przywołanych publikacji. Spodziewałbym się w tym miejscu szerokiej analizy, jak dalsze zaproponowane rozwiązania w rozprawie mają się w stosunku do obecnego stanu wiedzy – szczególnie przywołanych publikacji [23], [27], [29-32], [48], [61] i [68] (analizowanych dopiero w podrozdziale 4.6)?
- Strona 19_8: Autor określa przywołany instrument pomiarowy mianem precyzyjnego – jakie przyjęto kryterium rozróżniające jego pracę od instrumentów nieprecyzyjnych? O jakich zakresach pracy, rozdzielczościach spektralnych i niepewności pomiarowej mówimy wówczas w przypadku tych drugich?
- Strona 21_{16}-21_{18}: Doktorant wzmiankuje tutaj, a od strony 40 przedstawia szczegółowo w rozprawie sposób w jaki pomiary hiperspektralne wykonywano w środowisku

kontrolowanym, przy znanym oświetleniu. Mając na uwadze proponowane opracowanie aparatury pomiarowej o walorach użytkowania w rzeczywistych uprawach pomidorów z użyciem drona lub sensora ręcznego (rysunek 12, strona 32) pojawia się pytanie - w jaki sposób zapewnić powtarzalność warunków oświetleniowych (niewrażliwość metody na nie) oraz jak przeprowadzić procesy kalibracyjne sensora, aby zachować poprawność pomiarów in situ? W przypadku nalotów pomiarowych z użyciem drona (akwizycja zdjęć i pomiary spektralne) wysokości pomiarowe są zgoła inne aniżeli te realizowane w badaniach laboratoryjnych Doktoranta (odpowiednio: 5 cm, 30 cm i 60 cm), gdzie te dla najniższej wysokości 5 cm, wykorzystano do przetwarzania danych, wstępnej analizy i utworzenia zbioru danych treningowych, uzasadniając jako najmniej zaszumione obrazem tła i najbardziej wiarygodne w procesie badawczym (strona 54 rozprawy).
Jak z dotychczasowych doświadczeń Autora wyglądać musiałaby modyfikacja obrazowania RGB, multi- i hiperspektralnego (w warstwach pomiarów/oprogramowania/sprzętu) w kontekście planowanych i sygnalizowanych na stronie 43 rozprawy przyszłych badań z użyciem sensorów ręcznych lub drona?

- Strona 22: Doktorant używa w tabeli 3 oraz tekście rozprawy metryki „dokładność [%]". Jak rozumiem chodzi o metrykę ACC (ang. *accuracy*) rozumianą jako dokładność klasyfikacji (prawdopodobieństwo prawidłowej klasyfikacji)? Brak ACC w Wykazie ważniejszych oznaczeń i skrótów.
- Strona 33_8-33_{11}: Zaproponowana koncepcja przyrządu pomiarowego chorób roślin z wykorzystaniem pomiarów hiperspektralnych i uczenia maszynowego, w której Doktorant upatruje środka do zrewolucjonizowania sposobu diagnozowania chorób roślin na dużą skalę, nie jest unikalna. Obecnie producenci systemów dronowych dostarczają zarówno sprzętu pomiarowego, jak i oprogramowania dla wsparcia rolnictwa precyzyjnego w tym zakresie.
- Na stronie 38 Doktorant nie odnosząc się do kontekstu, przytacza błędne i niestety (nad czym Recenzent ubolewa) powszechne w literaturze tłumaczenie skrótu FOV (ang. field of view) jako „pole widzenia soczewki". W kolejnej sentencji dodaje nadto bezwiednie domyślną wartość wynoszącą 25°. Mamy tutaj do czynienia z kątem widzenia soczewki wyrażonym w stopniach.
- W ostatnim wierszu tabeli na stronie 56 pojawia się odmiana „Polbig". Czy chodzi o Polfast?
- Na stronach 77-83 Doktorant w miejsce najniższej i najwyższej wartości wskaźnika F1 zarejestrowanej w wyniku badań błędnie pisze o najniższym i najwyższym wyniku wskaźnika F1. Wskaźniki cechuje wartość, nie wynik.
- Strona 85_{31}: Autor wskazuje, że proces eliminacji dobiegł końca, gdy ograniczono zbiór do 50 cech. Z czego wynika przyjęcie tej konkretnej liczby 50 cech?
- W rozdziale 10 zatytułowanym *Analiza skuteczności klasyfikacji chorób w kolejnych dniach od inokulacji*, w pierwszych podrozdziałach, na 19 kolejnych stronach rozprawy, Autor skupia się głównie na zaprezentowaniu bardzo dużej liczby wykresów z wyników treningu klasyfikatorów opatrzonych głównie komentarzem liczbowym w formacie mediana wskaźnika F1/odchylenie standardowe/średnia poprawa wyniku. Czy jest sens prezentowania wszystkich tych danych w ten sposób? Czy może jednak należało skoncentrować się dogłębniej na prezentowanych, wybranych treściach? Pośród nielicznych wniosków ze strony 107, przywołany wniosek 2 jest dla mnie nieakceptowalny: „(...) Może być to spowodowane błędnie wykonanymi pomiarami spektralnymi, jednak wymagałoby to pogłębionych badań". Przyznam, że jest to podejście nonszalanckie, szczególnie w kontekście rozprawy doktorskiej będącej wizytówką wschodzącego naukowca – jego kunsztu badawczego, zaangażowania i dojrzałości w dociekaniu prawdy. Kiedy jeśli nie teraz należy prowadzić pogłębione badania w przytoczonej powyżej sytuacji?

- Na końcu strony 114 Doktorant informuje, że dla przedstawionych wyników badań wyznaczono funkcje trendu na podstawie funkcji liniowej oraz wielomianu I-ego i II-ego stopnia. W tabeli na stronie 126 pojawiają się funkcje dopasowania oparte jedynie na podstawie funkcji liniowej oraz wielomianie II-ego stopnia. Co z przybliżeniem wielomianem I-ego stopnia?
- Na stronie 128 autor nawiązuje do rysunku 12 przedstawiającego koncepcję urządzenia pomiarowego do badań in situ opartego na użyciu drona lub sensora przenośnego. Nie bardzo rozumiem sens osadzenia w rozprawie rysunku 12, ani nawiązania ze strony 128, jeśli ograniczono się do obecnej, jedynie bardzo ogólnikowej formy zaprezentowania samej koncepcji urządzenia w rozprawie, a nie poświęcono temu zagadnieniu większej uwagi – ogniskując się na badaniach laboratoryjnych. Jest to wątek poboczny, a w moim odczuciu rozprawa zamiast zyskać na innowacyjności, traci spójność.
- Na stronie 129_{14} mowa jest o poprawie wyników klasyfikacji – na jakim poziomie?

Niestety, po lekturze rozprawy mam szereg zastrzeżeń do jej warstwy edycyjnej. Liczba i charakter błędów rzuca poważny cień na oryginalne i ciekawe wyniki merytoryczne rozprawy. Odpowiednio:

- Strony 4-6: Czy nie trafniej byłoby w miejsce *Wykazu ważniejszych oznaczeń i skrótów* ujętego w jedną zbiorczą tabelę zaproponować osobno spis symboli i osobno spis przyjętych skrótów dla poszczególnych terminów stosowanych w rozprawie? Uważam, że w obecnej formie w wykazie pojawiają się:
  (a) niekonsekwencja (niektóre nazwy definiowane są wyłącznie w języku polskim, inne – również w j. angielskim; raz jednostki pojawiają się w kolumnie *Opis*, innym razem – w kolumnie do tego dedykowanej, tj. *Jednostka*; raz symbol jednostki pojawia się zaraz za wartością, innym razem – poprzedzony spacją),
  (b) braki (np. jaka jest jednostka długości fali? Jaki przyjęto układ jednostek miar?),
  (c) niejednoznaczności – dla przykładu: czy Doktorant ma na myśli na pewno irradiancję czy irradiancję spektralną? W układzie SI jednostką irradiancji jest W/m^2, a irradiancji spektralnej (irradiancji odniesionej do jednostki szerokości widma) odpowiada jednostka prezentowana w rozprawie.
  Zdumienie moje budzą również jednostki przypisane poszczególnym typom energii przypadającym na m^2, które Doktorant opisuje jako W/m^2. W układzie SI wat jako jednostka mocy odnosi się terminologicznie do strumienia energii. Czy w prezentowanym w rozprawie znaczeniu nie jest więc dalej mowa o natężeniu promieniowania (mocy przypadającej na daną jednostkę powierzchni)?
- Strona 7_4: brakuje spacji pomiędzy kolejnymi zdaniami.
- Strona 7_{13}: literówka, powinno być: *inteligentne systemy*.
- Strona 7_{26}: literówka, powinno być: *z dużą dokładnością*.
- Rozprawa w licznych fragmentach nie została zredagowana najlepiej. Proszę porównać przykładowo: Strona 9_1-9_5 oraz Strona 12_1-12_5 i jej dolny fragment – w licznych miejscach w rozprawie dostrzegam brak starania o jednolity format edycyjny, razi brak konsekwencji w posługiwaniu się światłem w tekście rozprawy i brak kontroli w łamaniu tekstu (np. ostatnia linia ze strony 14). W dobie powszechnego dostępu do narzędzi pozwalających na automatyczne rozmieszczenie tekstu (w tym kontrolę wyjustowania, wdów, bękartów, szewców i sierot), uważam przygotowanie rozprawy za niestaranne. Niestety, recenzując przedłożoną mi wersję rozprawy, odnosiłem wielokrotnie wrażenie pracy z wersją roboczą jej tekstu.
- Strona 12_8: literówka, powinno być: *Zgodnie z Polską Klasyfikacją Wyrobów i Usług*.

- Strona 16_2: literówka, powinno być: *m.in.*
- Strona 16: literówka, w ostatniej linii powinno być: *takich jak*.
- Strona 17_9: literówka, zbędny nawias za 29-33.
- Strona 17_{19}: brakuje spacji pomiędzy *buraka cukrowego* a *[55]*.
- Strona 18_{11}: literówka, w ostatniej linii powinno być: *obrazu*.
- Strona 19_{19}: powinno być: *na rysunkach 18-20*.
- Strona 21_1-21_4: niezrozumiała sentencja: „Tak samo, jak w przypadku obrazowania wielospektralnego dostępne są pozyskanie obrazowania hiperspektralnego z orbity, jednak liczba satelitów wyposażonych w instrumenty służące do akwizycji obrazowania hiperspektralnego jest znacznie mniejsza niż tych wyposażonych w instrumenty do akwizycji obrazowania multispektralnego".
- Strona 21_5-21_8: „W chwili pisania niniejszej pracy w fazie uruchomieniowej znajduje się (...), a w roku 2023 ma zostać uruchomiony polski satelita (...)". Rozprawa została złożona do recenzji w czwartym kwartale 2023 roku. Informacje te powinny zostać zaktualizowane. W mojej ocenie Autor przed złożeniem rozprawy nie przeczytał jej treści wnikliwie. Na potwierdzenie przywołuję kolejną, niezrozumiałą dla mnie sentencję z tej strony: Strona 21_8-21_9: „Ten ostatni jest, w przeciwieństwie do poprzedników będzie wykonywał przetwarzania danych na orbicie, co rozwiązuje problem ograniczonego przesyłu dużych wolumenów danych." I dalej mamy sentencję z dwoma kolejnymi błędami edytorskimi: Strona 21_{13}-21_{15}: „Dodatkowo, tak w przypadku obrazowania multispektralnego wymagane jest wykonanie odpowiednich, -odatkowych kroków pośrednich – korekcji geometryczna, czy korekcja atmosferyczna."
- Inne, niezrozumiałe dla mnie sentencje w rozprawie:
  a) Strona 24_{30}: „Pierwszy z omawianych problemów w początkowej fazie badań wybrano 15 istotnych pasm (...)".
  b) Strona 26: W zamieszczonej tabeli pojawiają się nieprzetłumaczone fragmenty z języka angielskiego ze znakami zapytania. Podobnie wtrącenia z języka angielskiego (bez wyjaśnienia kontekstu pojawiają się w tabeli 6 na stronie 38).
- Dla zachowania przejrzystości niniejszej recenzji, w dalszej jej części ograniczyłem się jedynie do wskazania lokalizacji kolejnych uchybień edycyjnych – odpowiednio: Strona 21_{36} (powinno być: *obrazowania*), Strona 21_{43} (powinno być: *bakteryjnej*), Strona 24_{18} (powinno być: *od 3. do 21 dnia*), Strona 25 (w tabeli powinno być: *30 zakażonych*), Strona 25 (w ostatniej linii powinno być: *tych*), Strona 28_6 (powinno być: *zastosowana*), Strona 31_{11} (powinno być: *na rysunku 11*), Strona 37_3 (powinno być: *w tabeli 6*), Strona 42_6 (powinno być: *na rysunkach 18-20*), Strona 44_{10} (powinno być: *w tabeli 7*), Strona 44_{14} (powinno być: *na rysunku 22*), Strona 46_6 (powinno być: *zdecydowano się*), Strona 54_3 i Strona 54_{15} (brak spacji), Strona 54_{21} (powinno być: *liczba pomiarów* zamiast *ilość*), Strona 54_{26} (powinno być: *w innych działaniach*), Strona 73_{12} (powinno być: *Wariant pierwszy*), Strona 85_{11} (powinno być: *w wysokiej rozdzielczości spektralnej* oraz *charakterystyka spektralna badanego obiektu*), Strona 86_6 (powinno być: *na rysunku 50*), 91_{12} (powinno być: *w sposób analogiczny*), Strona 131_{17} (brak spacji), Strona 132_{22} (powinno być: *innym uprawom*).

4. Ocena końcowa i wniosek

Przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska mgra inż. Krzysztofa Smykały stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego, a Doktorant wniósł wkład w rozwój dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Wykazał się przy tym umiejętnością pracy w grupie badawczej, współpracując z przemysłem i jednostkami naukowymi z innych dyscyplin naukowych, co odbieram za istotną wartość dodaną w przypadku badań interdyscyplinarnych. Przedstawione powyżej uwagi krytyczne i komentarze pozostają bez wpływu na moją pozytywną ocenę wartości naukowej rozprawy.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska **mgr. inż. Krzysztofa Smykały** pt. **Zastosowanie metod uczenia maszynowego i pomiarów hiperspektralnych w diagnostyce uprawy *Solanum lycopersicum***, której promotorem jest dr hab. inż. Michał Tomaszewski, prof. uczelni, a promotorem pomocniczym – dr inż. Bogdan Ruszczak, spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą ustawę *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz.U z 2023 r. poz.742)*. **Stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

Wojciech Giernacki

/Wojciech Giernacki/