

Gliwice, dn. 11 stycznia 2026 r.

dr hab. inż. Erwin MACIAK, prof. PŚ
Wydział Elektryczny, Katedra Optoelektroniki
ul. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: **Metodologie akwizycji, przetwarzania i analizy optycznych danych hiperspektralnych w aplikacjach przemysłowych, kosmicznych, górniczych i rolniczych**

Autor rozprawy: **mgr inż. Jędrzej KOWALEWSKI**

Promotor rozprawy: **prof. dr hab. inż. Jarosław DOMARADZKI**

Niniejsza recenzja została przygotowana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej, na podstawie pisma przesłanego przez Przewodniczącą Rady Dyscypliny AEEiTK PWr, Pana Profesora Andrzeja Dziedzica – pismo sygn.. RDN AEETK/143/2025 z dnia 29 września 2025 r.

1. Charakterystyka wyboru tematu i ogólna wartość naukowa rozprawy

Technika obrazowania hiperspektralnego (HSI) integruje klasyczne obrazowanie przestrzenne z metodami spektroskopowymi, umożliwiając jednoczesną rejestrację dwuwymiarowej (2D) informacji przestrzennej oraz pełnej informacji spektralnej. W wyniku pomiaru, dla każdego elementu obrazu uzyskiwana jest charakterystyka spektralna w postaci krzywej reflektancji w funkcji długości fali, stanowiącej unikalną sygnaturę badanego materiału. Rozkład energii promieniowania odbitego, absorbowanego i transmitowanego przez obiekt jest determinowany przez jego właściwości materiałowe, stan powierzchni oraz długość fali padającego promieniowania. Zależności te znajdują bezpośrednie odzwierciedlenie w kształcie rejestrowanych krzywych spektralnych. Zbiór uzyskanych charakterystyk spektralnych, obejmujących setki wąskich pasm widmowych rejestrowanych w różnych zakresach spektrum elektromagnetycznego, tworzy trójwymiarową strukturę danych, w której każdemu pikselowi obrazu przestrzennego odpowiada pełne widmo. Struktura ta określana jest mianem hipersześcianu danych (ang. hypercube). Technika hiperspektralnego obrazowania (HSI) odgrywa ważną rolę w pozyskiwaniu szerokopasmowej, wielowymiarowej wiedzy o otaczającym nas środowisku. Jest przydatna zarówno w wymiarze naukowym, jaki i w technologiach przemysłowych. Jest tak dlatego, iż technika HSI posiada zdolność do generowania wielowymiarowych, obiektywnych i wysokorozdzielczych spektralnie danych, które umożliwiają precyzyjną analizę złożonych ekosystemów środowiskowych i/lub systemów przemysłowych. Mogą wspierać automatyzację procesów decyzyjnych oraz efektywnie adresować globalne wyzwania w takich dziedzinach jak teledetekcja, ochrona środowiska, zmiany klimatyczne czy badania materiałowe, i in. Zatem technika HSI, jako zaawansowane foniczne, optoelektroniczne narzędzie pomiarowe, stanowi istotny segment nowoczesnych metod pozyskiwania i interpretacji danych w różnorodnych zastosowaniach naukowych i przemysłowych.

W wymiarze technicznym obrazowanie hiperspektralne polega na rejestracji promieniowania elektromagnetycznego UV-Vis-NIR w bardzo wielu, zwykle od 100 do 200 kanałów spektralnych, stanowiących zbiór wąskich widmowo pasm. Taki zbiór danych dostarcza znacznie więcej informacji spektralnych o obserwowanej scenie niż tradycyjne obrazy RGB. Dlatego do podstawowych zalet techniki HSI należy zaliczyć przede wszystkim wysoką rozdzielczość spektralną, która posiada potencjał bardzo dokładnego rozróżniania różnych materiałów i substancji, w tym potencjalnie umożliwia analizę składu chemicznego obiektów. Inną ważną cechą jest uniwersalność tej techniki pomiarowej. Możemy ją stosować w bardzo wielu dziedzinach, m. in. takich jak rolnictwo, sztuka, archeologia, teledetekcja czy medycyna. Rezultatem stosowania technik HSI jest możliwość tworzenia zaawansowanych, dokładnych modeli i algorytmów klasyfikacji materii w różnych środowiskach i ekosystemach.

Jednak technika HSI nie jest wolna od ograniczeń (czy wad). Do najistotniejszych należy zaliczyć: wysoki koszt zarówno sprzętu do rejestracji danych, jak i systemów przetwarzania dużych zbiorów danych. Duża objętość danych generuje trudności i koszty zarówno po stronie akwizycji danych, jak i ich zaawansowanego przetwarzania, które wymaga specjalistycznej wiedzy (lub zaawansowanych modeli SI) do interpretacji danych. Do innych ważnych ograniczeń należy zaliczyć skończoną rozdzielczość przestrzenną obrazowania, często niższą niż w tradycyjnych obrazowaniach RGB. Dodatkowo, ponieważ technika HSI pracuje najczęściej w paśmie UV-Vis-NIR może być wrażliwa na warunki atmosferyczne i może być zakłócana np. przez mgłę, deszcz czy inne zjawiska atmosferyczne.

Dlatego pomimo wysokiego potencjału informacyjnego obrazowania hiperspektralnego, jego praktyczne zastosowanie pozostaje ograniczone do wąskiego zakresu dziedzin o wysokiej wartości dodanej. Główną przyczyną tego stanu są istotne bariery ekonomiczne i techniczne, obejmujące złożoność konstrukcyjną instrumentów, wysokie koszty akwizycji i przetwarzania danych, wymagania dotyczące mocy obliczeniowej oraz ograniczenia radiometryczne i operacyjne. W konsekwencji klasyczne systemy hiperspektralne są nieprzystosowane do szerokiego wdrażania w aplikacjach niskokosztowych, mobilnych i konsumenckich.

Jednocześnie brak jest jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, w jakim stopniu pełnowymiarowe obrazowanie hiperspektralne jest rzeczywiście niezbędne do realizacji podstawowych zadań klasyfikacji i identyfikacji obiektów, a w jakim możliwe jest osiągnięcie porównywalnej skuteczności przy wykorzystaniu systemów o uproszczonej architekturze spektralnej. I właśnie tak sformułowane pytanie - zagadnienie badawcze próbuje rozwiązać Pan mgr inż. J. Kowalewski w niniejszej dysertacji.

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. J. Kowalewskiego stanowi wartościowy i oryginalny wkład w rozwój technologii obrazowania spektralnego, w szczególności w obszarze projektowania i analizy uproszczonych systemów wielo(multi)spektralnych (MSI). Wartość naukową rozprawy wzmacnia fakt, że zaproponowane rozwiązania nie ograniczają się do analiz teoretycznych, lecz zostały zweryfikowane w oparciu o rzeczywiste dane hiperspektralne pochodzące z różnych instrumentów i aplikacji. Umożliwia to dobrą generalizację wniosków oraz zwiększa ich wiarygodność naukową. Praca wnosi także istotny wkład metodyczny, oferując spójną metodologię syntezy uproszczonych systemów obrazowania spektralnego, która może stanowić punkt odniesienia dla dalszych badań.

W dalszej części moja szczegółowa ocena rozprawy doktorskiej Pana Kowalewskiego opiera się na analizie następujących elementów dysertacji: sformułowanie problemu, tezy i zakresu pracy, ocenie struktury rozprawy i jej strony warsztatowej. Finalnie ocenie został poddany dobór metod badawczych oraz metodologia rozwiązania postawionego problemu badawczego.

2. Struktura i zawartość merytoryczna rozprawy. Umiejętność przedstawienia podjętej tematyki i rezultatów pracy badawczej

Rozprawa napisana jest w języku polskim zawierającym, poza kilkoma sformułowaniami, prawidłowo zastosowane słownictwo techniczne i branżowe. Podział prac, opisy i wnioski Autor przedstawił w sposób jasny, logiczny i zrozumiały. Układ pracy jest przejrzysty.

Wstęp wprowadza czytelnika w świat pomiarów spektralnych. Odnosząc się bezpośrednio do całościowej składni recenzowanej rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. J. Kowalewskiego należy zauważyć, że temat pracy został wybrany i określony poprawnie. Praca ma odpowiednią, pod względem formalnym postać; posiada klarowny podział na rozdziały i podrozdziały, a jej treść Autor wzbogacił licznymi rysunkami i wykresami (121) oraz tabelami (24) wystarczająco dobrze korespondującymi z omawianymi zagadnieniami. Dodatkowo rozprawa uzupełniona jest listą najważniejszych akronimów (nie jest to lista wszystkich, występujących w pracy, akronimów), streszczeniem pracy oraz wykazem współautorskich osiągnięć Autora, w tym publikacji naukowych.

Autor w streszczeniu i podsumowania syntetycznie przedstawił strukturę i zawartość merytoryczną rozprawy doktorskiej, co ułatwia jej lekturę.

Rozprawa cechuje się logiczną, spójną i konsekwentnie realizowaną strukturą, w której kolejne rozdziały prowadzą czytelnika od szerokiego kontekstu technologicznego, przez analizę teoretyczną i metodologiczną, aż do szczegółowych badań eksperymentalnych i weryfikacji postawionej tezy. Przyjęty układ odpowiada klasycznemu schematowi pracy doktorskiej o profilu techniczno-inżynierskim i jest adekwatny do złożoności podejmowanej problematyki.

W rozdziale I, który stanowi syntetyczne wprowadzenie do dysertacji, Autor prowadzi czytelnika w świat precyzyjnych, przemysłowych pomiarów spektralnych, uzasadnia podjęcie tematu oraz formułuje założenia, cele i tezę pracy.

Rozdziały 2–5 pełnią funkcję rozbudowanego zaplecza teoretyczno-metodologicznego. Przedstawione w nich studium literaturowe jest obszerne i świadczy o bardzo dobrej orientacji Autora w stanie wiedzy, zarówno historycznym, jak i współczesnym. Na szczególną uwagę zasługuje szerokie ujęcie technik akwizycji oraz platform obrazujących, które umożliwiło sformułowanie ogólnej metodologii doboru instrumentów spektralnych. Jednocześnie kumulacja treści przeglądowych w kilku kolejnych rozdziałach prowadzi miejscami do wrażenia nadmiernej rozbudowy części wstępnej, co może osłabiać proporcje pomiędzy opisem stanu wiedzy a prezentacją oryginalnego wkładu naukowego.

W rozdziale trzecim omówiono zasady rejestracji promieniowania elektromagnetycznego w systemach 2-wymiarowego (2D) obrazowania spektralnego oraz przedstawiono formalne definicje systemów multispektralnych (MSI) i hiperspektralnych (HSI). Przeanalizowano różne podejścia do akwizycji danych spektralnych, uwzględniając ich uwarunkowania techniczne i funkcjonalne, a także scharakteryzowano kluczowe elementy składowe systemów spektrofotometrycznych wraz z oceną ich dostępności na rynku komercyjnym. Istotną część rozdziału stanowi autorska propozycja sformalizowanego podejścia do doboru odpowiedniego systemu dwuwymiarowego obrazowania spektralnego, uwzględniającego zarówno specyfikę zastosowania, jak i ograniczenia wynikające z warunków brzegowych pracy systemu. Zaproponowana algorytmizacja procesu decyzyjnego stanowi próbę uporządkowania kryteriów projektowych oraz ułatwienia syntezy systemów obrazowania spektralnego dostosowanych do konkretnych scenariuszy aplikacyjnych.

Rozdział 4 wnosi istotną wartość aplikacyjną, ukazując rzeczywiste bariery wdrożeniowe systemów HSI oraz ilustrując je doświadczeniami Autora zdobytymi w warunkach przemysłowych. Ten element pracy oceniam bardzo pozytywnie, gdyż wzmacnia jej praktyczny charakter i potwierdza kompetencje Autora w zakresie projektowania rzeczywistych systemów obrazowania spektralnego. Jednocześnie rozdział ten pełni rolę pomostu pomiędzy teorią a badaniami własnymi.

Rozdział 5 jest kluczowy z punktu widzenia dalszych prac badawczych, gdyż systematyzuje metody przetwarzania i analizy danych hiperspektralnych oraz identyfikuje główne składowe obliczeniowe systemów HSI. Trafnie podkreślono w nim znaczenie algorytmów redukcji wymiarowości i ich rolę w kontekście uproszczonych systemów spektralnych. Rozdział ten dobrze przygotowuje grunt pod badania eksperymentalne, choć miejscami jego charakter pozostaje bardziej przeglądowy niż analityczny.

Część eksperymentalna pracy, obejmująca rozdziały 6–8, stanowi właściwy element dysertacji. Rozdział 6 wnosi wkład poprzez empiryczne porównanie różnych elementów filtrujących stosowanych w systemach HSI, co ma bezpośrednie znaczenie dla projektowania uproszczonych układów obrazowania spektralnego. W tym rozdziale dysertacji zauważalna jest istotna nadreprezentacja treści poświęconych elementarnym zjawiskom fizycznym, których zakres i sposób prezentacji odpowiadają w dużej mierze poziomowi nauczania średniego. Dotyczy to w szczególności opisów podstawowych własności promieniowania elektromagnetycznego, prostych mechanizmów załamania, dyfrakcji, odbicia i absorpcji światła oraz ogólnych zasad działania elementów optycznych tj. pryzmat, siatka dyfrakcyjna, etc. Treści te, choć poprawne merytorycznie, nie wnoszą istotnej wartości poznawczej dla czytelnika posiadającego przygotowanie akademickie i prowadzą w mojej opinii do nieuzasadnionego rozbudowania części teoretycznej pracy.

Rozdział 7 prezentuje szeroko zakrojone badania algorytmiczne, oparte na zróżnicowanych zbiorach danych i dużej liczbie eksperymentów obliczeniowych. Skala analiz oraz rzetelność statystyczna wyników świadczą o dojrzałości metodologicznej Autora. Uzyskane rezultaty jednoznacznie wspierają tezę o możliwości skutecznego przetwarzania danych silnie zredukowanych.

Rozdział 8 pełni funkcję kulminacyjną pracy i w sposób bezpośredni odnosi się do weryfikacji tezy badawczej. Przedstawiona metodologia syntezy uproszczonych systemów multispektralnych jest logicznym zwieńczeniem wcześniejszych analiz teoretycznych i eksperymentalnych. Wnioski sformułowane w tym rozdziale są spójne z założeniami pracy i stanowią jej główny wkład naukowy oraz aplikacyjny.

Praca liczy 181 stron i zawiera, jak przedstawiono powyżej, wstęp, siedem merytorycznych rozdziałów i podsumowanie (9-ty rozdział). Obejmuje wykaz cytowanej, aktualnej literatury. Wykaz cytowanych prac (publikacji naukowych i witryn internetowych) zawiera 107 pozycji, w tym 1 współautorska praca Pana J. Kowalewskiego (poz. 58) w czasopiśmie *Metrology and Measurement Systems*. Dobór cytowanych prac i materiałów świadczy o dobrej orientacji Doktoranta w przedmiotowej tematyce. Autor powołuje się zarówno na prace fundamentalne, jak i opracowania naukowe prezentujące najnowsze trendy w technikach obrazowania HSI i MSI.

Stwierdzam, że Autor wykazał się umiejętnością poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników zachowując przy tym cechy pracy naukowej. Autor przedstawił we właściwy i przejrzysty sposób rezultaty osiągnięte w wyniku realizacji pracy doktorskiej, ułatwiając czytelnikom pracy wnioskowanie na ich podstawie. Wnioski zostały opatrzone krytyczną analizą, co w dobrym świetle prezentuje warsztat Pana mgr inż. J. Kowalewskiego

3. Problem naukowy rozprawy - trafność i jasność jego sformułowania.

Niniejsza praca doktorska koncentruje się na kluczowych wyzwaniach związanych z technologią hiperspektralnego obrazowania (HSI), która, mimo ogromnego potencjału, napotyka ograniczenia wynikające z wysokiej złożoności, barier sprzętowych oraz znaczących kosztów, co ogranicza jej zastosowanie w wielu dziedzinach. W świetle tak przedstawionego zagadnienia Pan mgr inż. J. Kowalewski formułuje następujący problem badawczy: czy możliwe jest zaprojektowanie uproszczonych systemów obrazowania spektralnego, o istotnie zredukowanej liczbie kanałów spektralnych i uproszczonej konstrukcji optycznej, które – przy zachowaniu akceptowalnych wymagań radiometrycznych i obliczeniowych – umożliwią realizację podstawowych zadań klasyfikacji i identyfikacji obiektów ze skutecznością porównywalną do klasycznych systemów hiperspektralnych, a

tym samym pozwolą na obniżenie kosztów i zwiększenie dostępności tej technologii w szerokim spektrum zastosowań? Problem główny implikuje następujące szczegółowe pytania badawcze:

- jaki minimalny zestaw kanałów spektralnych jest wystarczający do skutecznej realizacji wybranych zadań klasyfikacyjnych?

- w jaki sposób dobór i szerokość pasm spektralnych wpływają na skuteczność klasyfikacji oraz właściwości radiometryczne systemu?

- jakie kompromisy pomiędzy złożonością sprzętową, jakością danych a skutecznością algorytmów są akceptowalne z punktu widzenia aplikacji docelowych?

- w jakim stopniu redukcja wymiarowości danych spektralnych może zastąpić pełne obrazowanie hiperspektralne w systemach zadaniowych?

- jakie implikacje projektowe wynikają z zastosowania uproszczonych systemów spektralnych dla ich integracji w rozwiązaniach mobilnych i niskokosztowych?

Sformułowany problem badawczy odpowiada na aktualne potrzeby rozwoju technologii obrazowania spektralnego, ukierunkowane na jej egalitarność i adaptację do zastosowań masowych. Rozwiązanie problemu powinno mieć potencjał zarówno poznawczy – poprzez lepsze zrozumienie relacji pomiędzy informacją spektralną a skutecznością klasyfikacji – jak i praktyczny, umożliwiając projektowanie tańszych, prostszych i bardziej energooszczędnych systemów obrazowania.

Problem jest istotny, bardzo aktualny i znajduje silne uzasadnienie w analizie potrzeb różnych gałęzi przemysłu co potwierdza jego wartość poznawczą, konstrukcyjną i aplikacyjną.

Rezultatem tak sprecyzowanego problemu badawczego było postawienie przez Autora tezy badawczej w brzmieniu:

„Systemy hiperspektralne o uproszczonej konstrukcji optycznej i znacząco zredukowanej liczbie kanałów spektralnych, mogą realizować większość podstawowych zadań klasyfikacji i identyfikacji obiektów ze skutecznością porównywalną do klasycznych systemów hiperspektralnych o wysokiej liczbie kanałów spektralnych, pod warunkiem optymalnego doboru pasm i wykorzystania zaawansowanych metod przetwarzania danych”.

Teza jest dobrze umotywowana zarówno teoretycznie, jak i praktycznie. Odwołuje się do kluczowego faktu, że nadmiarowość spektralna danych hiperspektralnych jest wysoka, a informacja dyskryminacyjna dla wielu zadań klasyfikacyjnych zawarta jest w ograniczonej liczbie pasm. W tym kontekście: redukcja liczby kanałów spektralnych jest zgodna z teorią selekcji cech i redukcji wymiarowości, uproszczenie konstrukcji optycznej bezpośrednio przekłada się na niższe koszty, większą niezawodność i łatwiejszą integrację systemów oraz wykorzystanie zaawansowanych metod przetwarzania danych (np. uczenia maszynowego) realnie kompensuje utratę części informacji spektralnej.

W tym zakresie teza trafnie identyfikuje aktualny trend w rozwoju systemów obrazowania: czyli przejście od maksymalizacji liczby kanałów do optymalizacji informacyjnej.

Pomimo swojej zasadności, wyżej sformułowana teza w mojej opinii nie ma charakteru uniwersalnego i jej prawdziwość jest silnie zależna od kontekstu aplikacyjnego. Sformułowanie w tezie „większość podstawowych zadań klasyfikacji i identyfikacji” jest nieprecyzyjne. W wielu zastosowaniach technik HSI, tak, raczej zaawansowanych – takich jak: identyfikacja związków chemicznych o bardzo zbliżonych sygnaturach, detekcja subtelnych zmian materiałowych, analiza mieszanin subpikselowych (tzw. unmixing), wysoka rozdzielczość spektralna pozostaje niezbędna, a redukcja liczby kanałów prowadzi do nieodwracalnej utraty informacji.

Teza jest szczególnie trafna w kontekście systemów zadaniowo zorientowanych, projektowanych pod konkretne klasy obiektów lub scenariusze obserwacyjne – Autor pokazał to w niniejszej dysertacji.

Udowodnił tym samym, że w takich przypadkach uproszczone systemy mogą: osiągać skuteczność porównywalną z pełnymi systemami hiperspektralnymi, a nawet przewyższać je pod względem efektywności kosztowej i operacyjnej, umożliwiać skalowanie technologii do zastosowań masowych.

Jednocześnie postawiona teza nie podważa zasadności istnienia klasycznych systemów hiperspektralnych, które pozostają niezastąpione w badaniach eksploracyjnych i zastosowaniach wymagających maksymalnej informacji spektralnej.

Podsumowując, sformułowany problem badawczy i teza są merytorycznie uzasadnione, aktualne i aplikacyjnie istotne. Należy jednak zauważyć, że zakres obowiązywania tezy jest ograniczony i zależny od charakteru zadania, stabilności sceny i warunków obserwacji, jakości doboru pasm spektralnych oraz dostępności i jakości metod przetwarzania danych.

4. Analiza metodyki rozwiązania problemu - dobór metod badawczych, narzędzi do analizy danych, krytyczna analiza wyników i umiejętność ich interpretacji na tle literatury przedmiotu. Ocena jasności i poprawności wniosków.

Metodologia rozwiązania problemu i spójność doboru metod badawczych

Metodyka badań polegała na analizie możliwości redukcji danych hiperspektralnych do uproszczonych reprezentacji multispektralnych poprzez selekcję kluczowych pasm spektralnych. Na podstawie symulacji przeprowadzonych na zróżnicowanych zbiorach obrazów HSI oceniono wpływ liczby i szerokości pasm na skuteczność klasyfikacji obiektów. Wykazano, że skuteczna klasyfikacja jest możliwa przy wykorzystaniu liczby kanałów znacznie mniejszej niż liczba pasm systemu hiperspektralnego, a nawet mniejszej niż liczba klas obiektów. Stwierdzono istnienie optymalnej szerokości pasma, która poprawia skuteczność klasyfikacji i jednocześnie zwiększa wykonalność technologii uproszczonych układów optycznych.

Zaproponowana metodologia ma charakter inżyniersko-aplikacyjny, co należy uznać za jej istotny atut. Autor wychodzi od jasno zdefiniowanego problemu klasyfikacyjnego i prowadzi badania w sposób **sekwencyjny i logiczny**, od danych referencyjnych (HSI), przez analizę i redukcję informacji spektralnej, aż po projekt uproszczonego instrumentu. Takie podejście jest zgodne z dobrymi praktykami w projektowaniu systemów obrazowania spektralnego. Metodologia badawcza została poprawnie osadzona w paradygmacie systemowym, w którym redukcja HSI do MSI jest rozpatrywana nie jako pojedynczy problem algorytmiczny, lecz jako zagadnienie ko-projektowania obejmujące:

- akwizycję spektralną,
- właściwości elementów optycznych,
- strukturę danych,
- algorytmy ML wieloetapowej analizy danych.

Taki dobór perspektywy metodologicznej jest bardzo zasadny i zgodny ze współczesnymi trendami projektowania systemów obrazowania, szczególnie w kontekście systemów wbudowanych i przetwarzania brzegowego. Jednocześnie bardzo trafnie podjęto próbę sformalizowania metodologii w postaci jednoznacznego algorytmu syntezy MSI (rozd. 8.6, rys. 8.16), co daje szansę na powtarzalność tej metodologii i możliwość bezpośredniej jej replikacji. Szansę, ponieważ metodologia ta jest w dużej mierze heurystyczna, oparta na decyzjach eksperckich, co z jednej strony zwiększa elastyczność rozwiązania, ale z drugiej obniża jego powtarzalność i obiektywność.

Narzędzia analityczne i badania eksperymentalne

Dobór metod **redukcji i selekcji cech (PCA, LDA, Random Forest)** jest zasadny z punktu widzenia praktyki analizy danych spektralnych i oceniam je pozytywnie, lecz ich użycie, zwłaszcza metody RF, nie zostało wystarczająco uzasadnione metodologicznie (ad uwagi do dyskusji). PCA i LDA

w kontekście redukcji HSI → MSI pełnią rolę narzędzi diagnostycznych, gdyż operują w przestrzeni cech oraz generują kombinacje liniowe pasm i nie prowadzą bezpośrednio do wyboru fizycznie realizowanych kanałów spektralnych. W szczególności PCA nie uwzględnia kryterium dyskryminacyjnego, a LDA opiera się na silnych założeniach statystycznych (zakłada liniową separowalność klas i rozkłady normalne).

RF jest metodą nieliniową i odporną na nadmiar cech, jednak miary ważności cech w RF są zależne od danych i parametrów modelu. Wybór nadzorowanych metod klasyfikacji RF (opartych na zbiorze drzew decyzyjnych) jest metodologicznie trafny ze względu na odporność na redukcję wymiarowości, a także niską złożoność obliczeniową. Nieco brakuje analizy stabilności uzyskanych wyników.

W pracy właściwie zaproponowano **metryki oceny skuteczności i wydajności czasowej** przetwarzania danych dla celu porównania różnych metod ML analizy i przetwarzania danych.

Eksperymentalne badania pryzmatów, siatek dyfrakcyjnych, filtrów Fabry-Perot i filtrów gradientowych **należy uznać za istotny i rzadko spotykany atut** metodologiczny. Dostarczają one rzeczywistych charakterystyk przestrzenno-spektralnych oraz wiedzy o kompromisach rozdzielczość-jasność-złożoność. Z punktu widzenia metodologii redukcji HSI do MSI badania te mają charakter porównawczy i potencjał optymalizacyjny, pomimo tego, że na tym etapie prac nie są formalnie włączone w pętlę decyzyjną wyboru pasm.

Eksperymenty polegające na **redukcji liczby kanałów, poszerzaniu okien spektralnych oraz analizie wpływu na skuteczność klasyfikacji** stanowią najbardziej bezpośredni i adekwatny element metodologii.

Krytyczna analiza wyników i interpretacja na tle literatury

Dobór narzędzi metodologicznych do realizacji redukcji HSI do MSI ostatecznie oceniam jako trafny i adekwatny do celu pracy. Być może momentami niewystarczająco sformalizowany i silnie ukierunkowany na analizę algorytmiczną niż na pełną syntezę systemową. Metodologia skutecznie potwierdza tezę badawczą, jednak pozostawia przestrzeń do dalszych badań nad integracją selekcji pasm, projektowania filtrów i szerszej walidacji prototypowej. **Studium literaturowe** w dysertacji spełnia funkcję identyfikacji ograniczeń HSI, przeglądu klasyfikacji technik akwizycji oraz wyznaczenia obszarów aplikacyjnych, w których redukcja jest zasadna. Z metodologicznego punktu widzenia jest to narzędzie poprawnie dobrane. Jego wykorzystanie ma charakter głównie opisowy. Nieco zabrakło jawnych kryteriów selekcji publikacji (a jest ich ogrom w tej tematyce) oraz jednoznacznego mapowania istniejących metod selekcji pasm na zaproponowane w pracy podejście.

Ocena jasności i poprawności wniosków

Przeprowadzona analiza zakresu prac, sposobu rozwiązania problemów oraz metodyki badawczej świadczy o umiejętnościach Doktoranta w systematycznym prowadzeniu badań naukowych. Konsekwentna realizacja założonych celów oraz wykorzystanie zasadniczo poprawnych i odpowiednich metod potwierdzają Jego zdolność do samodzielnego rozwiązywania złożonych problemów badawczych.

Ostatecznie wnioski końcowe przedstawione w rozprawie są logiczne i w pełni uzasadnione. Bezpośrednio odnoszą się do przedstawionych w pracy technicznych i analitycznych rozwiązań problemu badawczego. Autor wskazuje zarówno osiągnięcia naukowe, jak i aplikacyjne, demonstrując tym samym dojrzałość badawczą oraz kompetencje w zakresie zastosowania metod inżynierskich i spektralnej metrologii przemysłowej.

5. Oryginalność badań. Samodzielny i oryginalny dorobek Autora oraz pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę przedmiotu

Badania prezentowane w rozprawie cechują się w mojej opinii wysokim stopniem oryginalności, wynikającym z kilku aspektów. Moim zdaniem, najistotniejsze, syntetycznie zestawione osiągnięcia zawarte w rozprawie mgr inż. J. Kowalewskiego to:

a) eksperymentalne potwierdzenie tezy badawczej - przeprowadzone badania i symulacje jednoznacznie dowiodły tezę rozprawy doktorskiej, wykazując możliwość skutecznej klasyfikacji różnorodnych obiektów przy wykorzystaniu obrazów o liczbie kanałów spektralnych istotnie (o 2 rzędy) mniejszej niż liczba klas prawdy podstawowej. Stanowi to istotny wkład w obszar analizy i optymalizacji danych hiperspektralnych;

b) wykazanie możliwości daleko idącej redukcji danych hiperspektralnych - jednym z kluczowych osiągnięć jest udowodnienie, że pierwotne obrazy hiperspektralne mogą zostać zredukowane nawet do postaci pojedynczych, starannie dobranych kanałów spektralnych, bez istotnej utraty skuteczności klasyfikacji. Wynik ten ma fundamentalne znaczenie zarówno dla przetwarzania danych, jak i dla projektowania systemów obrazowania;

c) identyfikacja wpływu szerokości kanałów spektralnych na skuteczność klasyfikacji - badania wykazały, że kontrolowane poszerzanie kanałów spektralnych – do określonego, empirycznie wyznaczonego optimum – prowadzi do poprawy skuteczności klasyfikacji obiektów. Jednocześnie zidentyfikowano granicę, po przekroczeniu której dalsze poszerzanie pasma powoduje degradację jakości wyników. Ustalenie tego kompromisu stanowi istotną innowację projektową;

d) opracowanie zasad syntezy uproszczonych układów obrazowania spektralnego - zaproponowana przez Autora metoda syntezy uproszczonych systemów obrazowania spektralnego umożliwia świadome projektowanie instrumentów optycznych z uwzględnieniem zarówno skuteczności klasyfikacji, jak i ograniczeń technologicznych. Opracowanie to może stanowić praktyczne narzędzie wspierające inżynierów w procesie projektowania docelowych sensorów HSI;

e) wskazanie alternatywy dla klasycznych systemów hiperspektralnych - wyniki badań przeprowadzonych przez Pana Kowalewskiego dowodzą, że systemy multispektralne o niewielkiej liczbie kanałów mogą z powodzeniem zastępować klasyczne instrumenty hiperspektralne w zadaniach optycznej klasyfikacji obiektów. Rozwiązania te charakteryzują się znacznie niższym kosztem, mniejszą złożonością oraz większą wykonalnością implementacyjną;

f) wkład w upowszechnienie obrazowania spektralnego w przemysłowych zastosowaniach technicznych - przedstawione osiągnięcia istotnie zwiększają potencjał praktycznego wdrażania metod obrazowania spektralnego w aplikacjach klienckich i przemysłowych. Zaproponowane podejście sprzyja przejściu od wyspecjalizowanych, kosztownych systemów badawczych do szerokiego zastosowania technologii spektralnych w rozwiązaniach inżynierskich.

W mojej opinii kluczowym wkładem Autora w rozwój dyscypliny AEEiTK jest wykazanie, że **efektywna klasyfikacja spektralna nie wymaga pełnowymiarowych danych hiperspektralnych, lecz może być realizowana przy użyciu zoptymalizowanych, uproszczonych systemów multispektralnych**. Wyniki te mają zarówno istotną wartość poznawczą, jak i przede wszystkim bezpośredni potencjał aplikacyjny.

Znaczącą większość prac technicznych, eksperymentalnych i metrologicznych Autor wykonał samodzielnie. Należy jednak również zauważyć Zespół badawczy, w którym Doktorant realizował swoje prace naukowe. Myślę tutaj zarówno o środowisku biznesowym – firmie Scanway S.A., jak i naukowym, eksperckim wsparciu Pracowników Wydziału Elektroniki Fotoniki i Mikrosystemów Politechniki

Wrocławskiej. Wspólnie ww. środowiska stanowią doświadczony i kompetentny Zespół fachowców, który stworzył Doktorantowi odpowiednie warunki do działania i realizacji badań na wysokim poziomie naukowym.

Podsumowując, przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska **stanowi wystarczająco oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, konstrukcyjnego i praktycznego** oraz wykazuje na bardzo dobrym poziomie ogólną wiedzę teoretyczną Autora w tematyce dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne w zakresie fotonicznej i optoelektronicznej metrologii. Autor w rozprawie przedstawił rozwiązanie problemu z wykorzystaniem odpowiedniego instrumentarium metod oraz narzędzi badawczych.

6. Uwagi dyskusyjne i krytyczne. Uchybienia i słabsze strony rozprawy

Lektura rozprawy nasunęła mi kilka spostrzeżeń, wątpliwości, komentarzy, pytań i uwag dyskusyjnych dotyczących merytorycznej strony pracy. Mianowicie:

1. W pracy zidentyfikowałem **kilka niespójności pojęciowych**, wynikających z braku konsekwencji w stosowaniu terminologii. Autor wielokrotnie używa różnych pojęć o odmiennych znaczeniach do określenia tego samego zjawiska. Prowadzi to do niejasności interpretacyjnych oraz utrudnia ocenę poprawności toku rozumowania. Mieszanie znaczeń słów i sformułowań powoduje, że część argumentów traci walor analityczny, a wnioski z przedstawionych założeń nie wynikają w sposób jednoznaczny. Praca doktorska w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych powinna cechować się jednoznacznością terminologiczną i ścisłością wywodu, stanowi to uchybienie merytoryczne. Moim zdaniem najistotniejsze przykłady uchybień:

a) **rozszczipienia a rozpraszanie światła**: w pracy Autor nieprawidłowo opisuje zjawisko rozszczepienia światła pojęciem rozpraszanie światła, traktując je jako pojęcia równoważne (str. 34, 40, 42, 88, 94). Jest to błąd merytoryczny, ponieważ rozszczepianie światła odnosi się do separacji widma na jego składowe o różnych długościach fal (np. w pryzmacie), natomiast rozpraszanie opisuje zmianę kierunku propagacji światła na niejednorodnościach ośrodka lub cząstkach materii. Pomijanie tej różnicy świadczy o braku precyzji terminologicznej i prowadzi w najlepszym przypadku do nieuprawnionych uproszczeń w opisie zjawisk fizycznych;

b) **klasteryzacja a klasyfikacja**, czyli (różne) techniki segmentacji danych: klasteryzacja (lub inaczej analiza skupień lub grupowanie), jest to proces podziału zbioru elementów na podzbiory w taki sposób, aby elementy wewnątrz każdego podzbioru były bardziej podobne do siebie niż do elementów spoza tego podzbioru. Celem grupowania jest poszukiwanie naturalnych struktur lub skupisk w danych, co pozwala na identyfikację relacji między obiektami w zbiorze. W klasyfikacji mamy zbiór zmiennych w których poszczególne obserwacje są już przypisane do określonych grup docelowych. Taki zbiór stanowi wzorzec do przypisania nowej obserwacji do jednej z predefiniowanych klas. W przeciwieństwie do grupowania, klasyfikacja działa na danych, w których posiadamy zmienną zależną. Jak widać, pojęcia klasteryzacji i klasyfikacji danych po takim zdefiniowaniu łatwo możemy teraz odnieść do podziału na metody nienadzorowane i nadzorowane w procesach analizy danych. A tymczasem na str. 141 czytam: „Metody nadzorowane klasyfikacji stanowią znacznie skuteczniejszą grupę metod klasteryzacji czy też klasyfikacji danych hiperspektralnych.” Sformułowanie to jest niespójne pojęciowo, ponieważ metody nadzorowane nie są metodami klasteryzacji, lecz klasyfikacji, a klasteryzacja jest z definicji procesem nienadzorowanym. Na tym przykładzie sformułowania widać pomieszanie dwóch różnych paradygmatów analizy danych. Utrudnia to czytelność i zrozumienie pracy (np. opis doboru narzędzi analitycznych na str. 120).

2. Budowa układów optycznych autorskich skanerów. Jak i czy w ogóle stosowano korekcję aberracji chromatycznej w układach obiektywowych skanerów? Zakres widmowy pracy skanerów 350 nm – 1000 nm narzuca takie pytanie. Jak korygowano problem odbicia dyfuzyjnego, zwłaszcza w

przypadku skanera HSS-400 z układem galwanometrycznym? Proszę o skomentowanie problemu na obronie.

3. **Kryteria wyboru metod ML** do analizy danych HSI. W rozdziale 5 przedstawiono i wyjaśniono zalety i ograniczenia metod deterministycznych vs. metody uczące się, a także porównanie metod ML uczących się w sposób nienadzorowany i nadzorowany. Nie wyjaśniono natomiast jakie kryteria decydowały o wyborze do porównania spośród metod ML nienadzorowanych k-means i GMM oraz spośród metod ML nadzorowanych – Random Forest. Zwłaszcza paleta metod uczenia nadzorowanego stosowanych do analizy danych HSI jest znacznie bogatsza w aplikacjach i literaturze przedmiotu. Na przykład metoda maszyny wektorów nośnych (ang. Support Vector Machines, SVM) to jedna z kluczowych metod uczenia maszynowego, szczególnie skuteczna w zadaniach klasyfikacji i regresji, w których dane charakteryzują się dużą liczbą zmiennych (wymiarów) – patrz HSI. Inne k-NN (k-najbliższy sąsiad), DT (drzewa decyzyjne), NB (naiwny klasyfikator Bayesa). **Dlaczego RF? Co o tym wyborze zdecydowało?**

Natomiast w mojej ocenie wystarczająco dobrze porównane zostały metody ML PCA (nienadzorowana) i LDA (nadzorowana) do projekcji zmian wymiarowości zbiorów.

4. Ocena skuteczności działania modeli ML. Aby skutecznie porównywać i ulepszać modele, analitycy danych korzystają z różnych metryk i technik walidacyjnych. Ocena modeli to proces trudny, złożony i wieloetapowy, który powinien uwzględniać nie tylko statystyczną dokładność, ale również kontekst aplikacyjny, balans między różnymi typami błędów oraz odporność na dane nieznanne wcześniej modelowi. W niniejszej pracy **Autor zdecydował o wyborze współczynnika Jaccarda (IoU) jako metryki skuteczności modeli. Co zdecydowało o wyborze tej metryki?** W literaturze przedmiotu można znaleźć wykorzystanie takich metryk jak błąd średniokwadratowy (RMSE), średni błąd bezwzględny (MAE), podobieństwo strukturalne (SSIM), szczytowy stosunek sygnału do szumu (PSNR) czy względny bezwymiarowy błąd globalny w syntezie (ERGAS). Obrazy hiperspektralne posiadają cechy widmowe zależne od długości fali, zatem zastosowanie metryk RMSE i PSNR do analizy różnic w pikselach wydają się być lepszą metodą niż tradycyjne metryki jak współczynnik Jaccarda czy Dice'a(?).

5. Ponadto, przemyślałbym podsumowanie rozdziału 7 w kontekście powyższych uwag, ponieważ:

a) w punktach c) i e) na str. 141 pojawia się problem metodologiczny: LDA jest metodą nadzorowanej redukcji wymiarowości, wymagającą etykiet klas. Tymczasem tekst wielokrotnie odnosi się do „zastosowania LDA w metodach nienadzorowanych (k-means, GMM)”. Powoduje to niespójność logiczną, ponieważ w rzeczywistości algorytmy k-means i GMM nie są wówczas w pełni nienadzorowane, gdyż zastosowanie LDA implikuje użycie informacji o klasach przed klasteryzacją.

b) W punkcie e) str 141 stwierdzono: „Wydajność metod nienadzorowanych istotnie zmniejsza się [...] natomiast skuteczność metody LDA jest znacznie wyższa.” **Brak jest komentarza z odniesieniem się do kompromisu skuteczność–wydajność.** Wypadałoby to poddać dyskusji.

c) W części 7.4 na str. 142 napisano, że LDA: „... oparta jest na wykluczaniu pasm instrumentu hiperspektralnego”. Jest to uproszczenie prowadzące do nieścisłości, ponieważ LDA tworzy kombinacje liniowe cech (co przedstawiono na str. 77 i 78). Nie jest więc metodą selekcji pasm w sensie fizycznym lecz transformacją przestrzeni cech. Dalsza sugestia „fizycznej reprezentacji operacji LDA” poprzez filtry spektralne wymagałaby wyraźnego podkreślenia, że jest to aproksymacja koncepcyjna, a nie bezpośrednia implementacja algorytmu.

6. Zastosowanie obrazów hiperspektralnych jako punktu wyjścia jest metodologicznie uzasadnione ponieważ zapewnia maksymalnie pełną informację spektralną, umożliwia analizę redundancji pasm, a także pozwala na symulację różnych konfiguracji multispektralnych. Natomiast nieco **zabrakło poszerzonej, krytycznej refleksji nad reprezentatywnością danych HSI,**

szczególnie w kontekście późniejszego wdrożenia w warunkach rzeczywistych (np. zmienne oświetlenie, szумы, warunki atmosferyczne, etc.). **Problem skrótkowo podniesiono w rozdz. 5.3.1.** Należy jeszcze pamiętać, że silne poleganie na danych laboratoryjnych może ograniczać eksternalną trafność wyników.

7. Etap **symulacji multispektralnej jest kluczowy i stanowi mocny element metodologii** przyjętej w pracy, bo umożliwia testowanie wielu konfiguracji bez kosztownej budowy prototypów, skraca cykl projektowy instrumentu. Natomiast symulacje opierają się na założeniu idealnych charakterystyk filtrów (bez analizy nachylenia zboczy, crosstalk) i pominięto wpływ zjawisk fizycznych w detektorach (szum, dryft spektralny, nieliniowości detektorów). Zatem z naukowego punktu widzenia symulacje mają charakter wyidealizowany, co ogranicza możliwość generalizacji wyników na rzeczywiste instrumenty.

8. Silna **ingerencja decyzyjna człowieka nie jest sformalizowana** i nie podlega walidacji oraz nie jest opisana jako algorytm decyzyjny. W rezultacie taka metoda nie może być w pełni replikowalna i nie pozwala na niezależną weryfikację wyników. Wspomniałem o tym wyżej oceniając wybór metodologii badawczej.

9. Jeszcze **uwaga o tezie**. Warunek „optymalnego doboru pasm” ma charakter silnie idealizujący. W praktyce: dobór pasm jest zależny od sceny, warunków obserwacji i zmienności środowiskowej. Pasma optymalne dla jednego zbioru danych mogą być suboptymalne dla innego. Ponadto trzeba pamiętać, że projektowanie i realizacja fizycznych filtrów **o dokładnie zadanych charakterystykach spektralnych** również bywa technologicznie ograniczone. Gdyby w tezie precyzyjniej zdefiniowano warunki brzegowe uniknięto by nadmiernego uogólnienia. Po ich doprecyzowaniu stanowił by ona solidną podstawę dla dalszych badań nad projektowaniem zoptymalizowanych, uproszczonych systemów obrazowania spektralnego.

Błędy i nieścisłości:

- Określenie „rozpraszanie” jest w sposób nieuzasadniony używane do określania zjawiska rozszczepienia na str. 34, 38, 40, 42, 88, 94.
- W mojej opinii określenie „polowy” sensor nie jest najlepsze, ja używałbym sformułowania czujnik/sensor dwuwymiarowy 2D - ale uczciwie przyznaję, że pojęcie zdefiniowano na str. 50;
- Błędne odwołanie do rys. 2.7 na str. 50
- Błędnie numerowany rys. 8.20 (jest 2x 8.19)
- Sformułowanie „refleksyjność” na str. 72 nie jest najlepsze, ja użyłbym określenia: właściwości odbiciowe obiektów.
- Rozdz. 6 do istotnego skrócenia. Nadmiarowe treści, zbyt głęboko sięgające do wiedzy podstawowej.
- Charakterystyka i opis siatek dyfrakcyjnych poprzez określenie ich stałych byłby lepszy moim zdaniem niż podawanie ilości rys/mm.

Wszystkie wskazane powyżej niedociągnięcia i uwagi krytyczne **nie mają krytycznego wpływu na moją pozytywną ocenę** uzyskanych rezultatów prac badawczych oraz zawartość merytoryczną niniejszej dysertacji.

7. Ocena końcowa z uzasadnieniem

Rozprawa wpisuje się w aktualny kontekst naukowo-techniczny, odnosząc się do współczesnych rozwiązań w dziedzinie wielospektralnego (MSI) i hiperspektralnego obrazowania (HSI) proponując innowacyjne jego uzupełnienie. Praca przedstawia alternatywne podejście do realizacji precyzyjnych pomiarów spektralnych, łącząc aspekty aplikacyjne z solidnym uzasadnieniem naukowym.

Zaproponowane metody przetwarzania danych hiperspektralnych stanowią interesującą demonstrację obecnych możliwości technologicznych, oferując nowe perspektywy w zastosowaniach takich jak teledetekcja, szerokie badania materiałowe w wielu branżach życia i przemysłu czy też monitorowania środowiska naturalnego.

Dysertacja Pana J. Kowalewskiego w pełni realizuje założenia stawiane dla prac doktorskich w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych. Praca zawiera właściwie zidentyfikowany problem badawczy, poprawną metodykę i trafny dobór narzędzi do jego rozwiązania oraz właściwą analizę eksperymentalną. Przedstawiona rozprawa doktorska stanowi kompleksowe opracowanie konstrukcyjno-badawcze, w ramach którego zaproponowano zoptymalizowany łańcuch przetwarzania danych, który potwierdza tezę, że możliwe jest projektowanie wyspecjalizowanych systemów wielospektralnych (MSI) o uproszczonej architekturze. Systemy te, dzięki precyzyjnej selekcji pasm spektralnych oraz implementacji nowoczesnych algorytmów analitycznych, osiągają efektywność porównywalną z tradycyjnymi systemami pełnospektralnymi, jednocześnie redukując koszty i złożoność wdrożenia. Wyniki te stanowią istotny krok w kierunku demokratyzacji dostępu do zaawansowanych fonicznych technik obrazowania hiperspektralnego.

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa Pana mgr inż. Jędrzeja Kowalewskiego, zarówno w odniesieniu do realizacji prac badawczych, jak i w wymiarze prac konstrukcyjno-eksperymentalnych **stanowi oryginalny wkład w rozwój dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne**. Pracę oceniam jako bardzo dobrą i zaliczam do prac **spełniających z naddatkiem wymagania** stawiane rozprawom doktorskim. Doktorant osiągnął cele, udowodnił tezę i wykazał się wiedzą oraz kompetencjami badawczymi wymaganymi do uzyskania stopnia doktora nauk inżyniersko-technicznych.

W związku z powyższym, ja, niżej podpisany stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. J. Kowalewskiego spełnia z naddatkiem wymagania określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669, z późn. zm.), i wnoszę do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektrotechnika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej o dopuszczeniu Pana mgr inż. Jędrzeja Kowalewskiego do dalszych etapów procedowania postępowania doktorskiego.



Erwin Maciak

podpis recenzenta