



prof. dr hab. inż. Piotr Kisała
Katedra Elektroniki i Technik Informatycznych
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Lubelska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jędrzeja Kowalewskiego: „*Metodologie akwizycji, przetwarzania i analizy optycznych danych hiperspektralnych w aplikacjach przemysłowych, kosmicznych, górniczych i rolniczych*”

1. Podstawa prawna

- pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej - prof. dr. hab. inż. Andrzeja Dziedzica z dnia 29.09.2025 o sygnaturze RDN AEETK/144/2025;
- Uchwała nr 291/13/RDND02/2024-2028 Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne z dnia 22 września 2025 r. w sprawie wyznaczenia recenzentów w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne Panu mgr. inż. Jędrzejowi Kowalewskiemu;
- Uchwała nr 81/3/RDN02/2021-2024 Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne z dnia 18 listopada 2024 r. w sprawie zaopiniowania Zasad wyróżniania rozpraw doktorskich w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne;
- Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2024 r., poz. 1571).

2. Ocena poziomu merytorycznego pracy

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Jędrzeja Kowalewskiego zatytułowana „*Metodologie akwizycji, przetwarzania i analizy optycznych danych hiperspektralnych w aplikacjach przemysłowych, kosmicznych, górniczych i rolniczych*” jest szczegółowym opisem autorskiej metody syntezy układów obrazowania spektralnego. Już we wstępie recenzji zaznaczam, że posiada ona bardzo istotny aspekt aplikacyjny. Wykonany w jej ramach przegląd literatury, badania oraz szereg wyników o znaczeniu użytkowym zostały już wykorzystane i wdrożone w firmie Scanway S.A. w ramach projektu *Doktorat Wdrożeniowy Edycja V*.

Już we wstępie autor sformułował hipotezę badawczą 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*”. W kolejnych rozdziałach pracy teza ta jest konsekwentnie bronią, a jej zasadność ostatecznie udowodniona w rozdziale ósmym, dotyczącym syntezy uproszczonych układów obrazowania spektralnego. Doskonałym przykładem weryfikacji postawionej hipotezy badawczej są również początkowe rozdziały pracy, w których zamieszczona jest szczegółowa analiza mocnych i słabych stron oraz zakresu stosowania istniejących już technik realizacji obrazowania multispektralnego (MSI) oraz hiperspektralnego (MSI). Praca posiada charakter badawczy oraz ważny aspekt technologiczny i potencjał wdrożeniowy. Składa się z części teoretycznej, do której należą rozdziały 1-5 oraz części praktycznej, dotyczącej aspektów wdrożeniowych, która z kolei zawarta jest w rozdziałach 6-8.

Wstęp zawiera syntetyczne wprowadzenie w tematykę i pozycjonuje pracę obok innych, należących do tego samego obszaru badawczego. W rozdziale tym autor zdefiniował cel pracy, którym jest opracowanie rozwiązań i metodologii akwizycji, przetwarzania i analizy w obrazowaniu hiperspektralnym, które pozwolą na wzrost liczby zastosowań i implementacji instrumentów HSI. Stwierdzam, że cel ten został osiągnięty, a stwierdzenie to zostało przeze mnie rozwinięte w dalszej części niniejszej recenzji.

Struktura rozprawy jest prawidłowa. Praca zawiera siedem rozdziałów merytorycznych, których zawartość i aspekty naukowe omówiono w niniejszym punkcie recenzji oraz podsumowanie z wnioskami końcowymi, których zasadność i trafność oceniono w końcowej części niniejszej recenzji. Obok rozdziałów *stricto* merytorycznych znajduje się również rozdział porządkowy (rozdział nr 1 za autorem), omawiający zakres poszczególnych rozdziałów i strukturę rozprawy. To również w tym rozdziale sformułowane zostały cele pośrednie pracy, tj. opracowanie studium literaturowego pod kątem stosowanych obecnie technik akwizycji, przetwarzania i analizy danych hiperspektralnych, przegląd literatury pod kątem zastosowań i aplikacji wykorzystujących akwizycję, przetwarzanie i analizę danych hiperspektralnych, wykonanie badań właściwości i parametrów kluczowych elementów kamer hiperspektralnych, porównanie różnych metod przetwarzania i analizy danych hiperspektralnych wraz z weryfikacją ich skuteczności i wydajności, zaprojektowanie uproszczonej architektury układów obrazowania hiperspektralnego oraz weryfikacja skuteczności uproszczonych układów obrazowania hiperspektralnego. W tym miejscu należy zwrócić uwagę, że autor skupił się na tej części promieniowania elektromagnetycznego, które zawiera się w zakresie tzw. światła widzialnego oraz podczerwieni.

W drugim rozdziale autor omówił rodzaje metod obrazowania oraz ich liczne zastosowania w nauce i technice. Opisał ewolucję technik obrazowania obejmując wiele lat ich doskonalenia. Skupił się na omówieniu analogowych klisz kolorowych i sensorów CCD oraz CMOS, począwszy od pierwszych kamer cyfrowych, skończywszy na aktualnych rozwiązaniach dostępnych komercyjnie. Rozwiązania opisane w tym rozdziale dotyczą technik akwizycji trzech kanałów spektralnych. Ważnym aspektem tej części pracy jest omówienie możliwości zastosowania systemów obrazujących w metrologii oraz automatyzacji, przy czym autor posługuje się konkretnymi przykładami systemów przetwarzania danych wizyjnych. W pracy wykorzystano również opracowanie podmiotu współpracującego w doktoracie, tj. firmy Scanway S.A. W rozdziale drugim jest to diagram Seidela dla poszczególnych elementów układu optycznego w teleskopie satelitarnym do obserwacji Ziemi dla misji *EagleEye*. Rozdział zawiera także opis zastosowań układów wizyjnych w sektorze produkcyjnym, obronnym, kosmicznym, górniczym, a także rolniczym.

Trzeci rozdział dotyczy metod rejestrowania promieniowania elektromagnetycznego w systemach obrazowania polowego, a także definiuje systemy multi i hiperspektralne, zwracając szczególną uwagę na liczbę kanałów oraz sposób i wielkość pokrycia przez te kanały odpowiedniego zakresu widmowego. Autor porównał zakresy spektrum akwizycji w systemach bazujących na kamerach monochromatycznych, RGB, a także w systemie multispektralnym i hiperspektralnym, opracowując autorskie diagramy i schematy przedstawiające odwzorowanie pikseli oraz pokrycie spektrum w tego typu układach. Istotnym elementem tej części pracy jest wykonany przez autora podział technik akwizycji obrazu w analizowanych systemach obrazowania. Autor przeanalizował także strukturę danych pojedynczej klatki pozyskiwanej w czterech rodzajach skanerów MSI i HSI, tj. skaner przestrzenny, skaner spektralny, skaner przestrzenno-spektralny oraz skaner typu snap-shot. Rozdział ten zawiera również przegląd nowatorskich metod akwizycji obrazu hiperspektralnego. Autor zestawia kamery hiperspektralne wykorzystujące element dyfrakcyjny oraz filtr Fabry-Perot (FP). Analizuje także dobór technik obrazowania do różnych zastosowań, biorąc pod uwagę zdolność do korejstracji danych, sprawność radiometryczną, rozdzielczość przestrzenną i spektralną, sprawność filtracji pasm, szybkość akwizycji, a także rozmiar oraz poziom skomplikowania systemu opto-mechanicznego. Analiza ta zakończona jest tabelarycznym zestawieniem poszczególnych technik obrazowania z wyszczególnieniem ich najważniejszych wad i zalet. Zestawienie to pokazuje, że nie ma idealnego i uniwersalnego systemu obrazowania hiperspektralnego i jest jednocześnie doskonałym wprowadzeniem w dalszą część pracy. Istotnym elementem tego rozdziału, systematyzującym wiedzę, jest graficznie przedstawiona metodologia doboru rodzaju systemu hiperspektralnego, omówiona również szczegółowo w dalszej części. Rozdział trzeci zawiera również opisy kilku typów sensorów stosowanych w systemach obrazujących wraz z przedstawieniem ich podstawowych parametrów oraz materiałów wykorzystywanych do budowy, w zależności od zakresu czułości spektralnej każdego z nich. Biorąc pod uwagę cel oraz tezę pracy stwierdzam, że zasadny jest również wykonany w tym rozdziale przez autora przegląd aktualnych wyzwań technologicznych powstających podczas dynamicznego rozwoju systemów multispektralnych.

Rozdział czwarty zawiera opis kluczowych aplikacji w przemyśle wytwórczym, w sektorze kosmicznym, górniczym oraz aplikacje rolnicze, realizowane między innymi w firmie Scanway S.A., w której - jak wspomniano na wstępie recenzji - wdrożone zostały wyniki recenzowanej pracy doktorskiej. Autor przedstawia system hiperspektralnej kontroli jakości w branży spożywczej wskazując, że pewne przedmioty o podobnym kolorze, można rozróżnić za pomocą kamery HSI. W przemyśle wytwórczym kluczowe aplikacje hiperspektralne to m.in.: inspekcja materiałów kompozytowych i tworzyw sztucznych, kontrola powłok i lakierów, weryfikacja składu chemicznego oraz sortowanie odpadów. Doktorant przedstawia również przykłady obrazu RGB z konwencjonalnej kamery, sygnatury spektralne obiektów na obrazie HSI oraz mapy pikseli dopasowanych do sygnatur spektralnych: asfaltu, trawy, dachów z pokryciem, ceramicznym, dachów z pokryciem bitumicznym, gleby i drzew. Jako przykład aplikacji górniczych odnajdujemy wycinek z raportu komercyjnego narzędzia *TerraEye*, przedstawiający zestawienie obrazów RGB oraz mapę wskazującą na przecieki podskórne mas wody z wyrobiska i składu odpadów górniczych w kopalni, a także skaner opracowany w trakcie realizacji doktoratu wdrożeniowego w trakcie gromadzenia danych hiperspektralnych

przez Doktoranta w obrębie wyrobiska miedzionośnego.

Rozdział piąty przedstawia koncepcję całej rozprawy polegającą na wykazaniu możliwości skonstruowania uproszczonych systemów multispektralnych, wykorzystujących wybrane zestawy danych niezbędnych w konkretnym zastosowaniu. Autor zestawia techniki przetwarzania i analizy danych hiperspektralnych i przedstawia analizy, które udowadniają zasadność zarówno opracowania metodologii redukcji wymiarowości danych, uproszczenia budowy instrumentu spektralnego jak również opracowania kompleksowej metody syntezy uproszczonych układów obrazowania spektralnego. Rozdział zawiera opis technik przygotowawczych do przetwarzania danych jak i technik redukcji wymiarowości oraz klasyfikacji. Analizując podstawowe wymagania stawiane systemom przetwarzania i analizy danych hiperspektralnych autor słusznie zauważa, że kanały spektralne nie odzwierciedlają pasm widzenia oka ludzkiego i dodatkowo stanowią informację nadmiarową w stosunku do możliwości zmysłu wzroku ludzkiego. Spośród całego spektrum cech kluczowych, jakimi powinny charakteryzować się platformy obliczeniowe stosowane w aplikacjach hiperspektralnych autor omawia najważniejsze z nich, tj. wysoką wydajność obliczeniową, czas reakcji (czas podejmowania decyzji) oraz algorytmy przetwarzania - uczenie maszynowe czy analiza statystyczna. W rozdziale omówiono również całą architekturę łańcucha oprogramowania przetwarzania danych hiperspektralnych zobrazowaną w postaci przejrzystego schematu przetwarzania danych. Autor przedstawiając łańcuch przetwarzania danych wykazuje konieczność zastosowania technik opartych na metodach sztucznej inteligencji skupiając się na wzajemnej relacji zbiorów algorytmiki przetwarzania i analizy danych. Szczegółowy opis przetwarzania wstępnego prowadzony jest od analizy redukcji szumu, metod normalizacji po korekcję danych, polegającą na dostosowaniu zmierzonych wartości intensywności pikseli do wartości radiometrycznych. Osobny podrozdział poświęcony jest problemowi redukcji wymiarowości. Znajduje się tutaj opis metody analizy głównych składowych (PCA) oraz liniowej analizy dyskryminacyjnej (LDA). Na uwagę zasługują wykonane przez autora wizualizacje redukcji wymiarowości tymi metodami, sporządzone jako osobne wykresy poprzedzone analizą równań wartości i wektorów własnych macierzy kowariancji. Dalsza część tego rozdziału dotyczy opisu metod analizy klasycznej, tj. deterministycznej oraz porównanie istniejących technik przetwarzania i analizy danych spektralnych. Autor udowadnia tezę, że spośród wielu technik przetwarzania i analizy danych hiperspektralnych żadna metoda nie jest doskonała, a jej zastosowanie w konkretnej aplikacji jest zależne od szeregu czynników. Zestawienie głównych rodzajów technik przetwarzania i analizy danych HSI w formie tabelarycznej wraz z kryteriami ich oceny jest ważnym elementem rozdziału i systematyzuje zawarte w nim informacje. Autor w zestawieniu tym bierze pod uwagę szereg istotnych kryteriów, tj. wymaganie prawdy podstawowej, sposób wyodrębniania kluczowych cech, zdolność wykrywania wzorców przestrzennych, możliwość pracy przy sygnałach/danych zaszumionych, czas obliczeń, złożoność a nawet zdolność do generalizacji. Autor stawia również słuszne, aczkolwiek dość oczywiste wnioski, że największe możliwości oferują sztuczne sieci neuronowe i nauczanie głębokie oferując, możliwość znajdowania skomplikowanych wzorców przestrzennych oraz automatyczną ekstrakcję cech kluczowych.

Ważnym z punktu widzenia wkładu własnego autora jest rozdział szósty. Autor przeanalizował w nim kluczowe elementy systemów hiperspektralnych, służących do rejestracji danych w określonych przedziałach długości fali. Rozdział ten zawiera również wyniki badań własnych doktoranta. W początkowej części autor opisał najważniejsze elementy filtrujące światło w systemach HSI skupiając się na elementach refrakcyjnych, tj. dyspersyjnych takich jak pryzmaty, elementach dyfrakcyjnych w postaci siatek dyfrakcyjnych, filtrów LVF oraz komponentach interferencyjnych, tj. filtrach Fabry-Perot. Na uwagę zasługuje zbudowane na potrzeby doktoratu stanowisko pomiarowe, którego główne funkcjonalności pozwalają na weryfikację jakości wykonania elementów filtrujących, jak również na uzyskanie charakterystyk spektralno-przestrzennych. Autor wykorzystuje je również do badania pryzmatów oraz siatek dyfrakcyjnych pracujących w trybie transmisyjnym, a także do badania filtrów interferencyjnych na sensorach CMOS. Opisane w tym rozdziale badania wykazały, że pryzmat, będący elementem dyspersyjnym charakteryzuje się stosunkowo dużą szerokością kanałów spektralnych. Doktorant zbadał również elementy dyfrakcyjne, przy czym obydwie analizowane siatki były strukturami jednorodnymi. Stwierdzenie, że na charakterystyce widmowej widoczne są odpowiedzi harmoniczne pochodzące z kolejnych rzędów dyfrakcji na tego typu elemencie jest dość oczywiste i nie wnosi nowej wiedzy w tym zakresie. Niemniej jednak część rozdziału poświęcona badaniom elementów dyfrakcyjnych oraz interferencyjnych posiada również wyniki ciekawe i istotne z punktu widzenia udowodnienia postawionej przez doktoranta tezy. Przykładowo, wykonane w ramach badań opisanych w tym rozdziale pomiary z wykorzystaniem kamery *Ximea* wykazały dwie ważne cechy filtrów FP: dobre właściwości filtracyjne maski FP naniesionej na sensor oraz wysoką sprawność kwantową filtrów FBG. Jest to istotne z punktu widzenia potencjalnych aplikacji, ponieważ pozwala na akwizycję obrazów przy bardzo małych czasach ekspozycji. Bardzo ważną częścią tego rozdziału jest analiza wyników badań w nim opisanych oraz sformułowanie wniosków końcowych, a także wybór optymalnych zastosowań poszczególnych elementów filtrujących. W części końcowej autor wskazuje optymalne rozwiązanie pod względem sprawności radiometrycznej oraz szerokości kanału spektralnego stwierdzając, że filtry LVF na szklanym podłożu, będące tym rozwiązaniem, są najbardziej dokładnymi elementami do budowy instrumentów spektrofotometrycznych. Jest to wniosek jak najbardziej uzasadniony i wynika wprost z wykonanych badań oraz ich analizy. Stosunkowo wąski zakres spektralny w porównaniu z innymi elementami filtrującymi może być zarówno wadą jak i zaletą, co jest zależne już od konkretnych aplikacji, w dalszej części recenzji zgłaszam prośbę

o odniesienie się do tej kwestii. Jak wspominałem wcześniej rozdział ten jest doskonałym nawiązaniem do kolejnych, a wyniki które w nim przedstawiono zostały wykorzystane już do budowy stanowisk przemysłowych. Dane z tych stanowisk analizuje autor w kolejnych rozdziałach pracy.

Rozdział siódmy traktuje głównie o opracowanych przez autora algorytmach testowych, danych wykorzystanych podczas badań eksperymentalnych, a także autorskich stanowiskach badawczych. Już na wstępie autor zdefiniował problem badawczy rozwiązywany przez niego podczas badania metod przetwarzania i analizy danych HSI. Przetwarzanie i akwizycja danych są to niezwykle ważne zagadnienia w procesie akwizycji danych hiperspektralnych i multispektralnych. Autor skupił się na maksymalizacji dwóch kluczowych parametrów tego typu systemów, tj. wydajności oraz skuteczności ich najważniejszych elementów składowych. Czynniki, od których te elementy są zależne są: złożoność i jakość danych wsadowych, rodzaj i klasa infrastruktury obliczeniowej, architektura oprogramowania i rodzaj złożoności modeli AI, a także to, jakie są rzeczywiste cele przetwarzania i analizy danych. Autor przeanalizował metody, algorytmy oraz modele najczęściej stosowane i najbardziej istotne ze względu na jego autorską metodykę syntezy układów spektralnych, opisaną z kolei w kolejnym rozdziale recenzowanej rozprawy. Biorąc pod uwagę dane wykorzystane w badaniach opisanych w rozdziale siódmym należy stwierdzić, że pochodzą one zarówno z baz skanów hiperspektralnych, jak również z autorskich stanowisk akwizycji hiperspektralnej. Co istotne, dane te mają różne rozmiary przestrzenne oraz różne zakresy widmowe. Stanowiska badawcze wykorzystują metodę punktowego przemiatacia powierzchni z wykorzystaniem spektrometru, tzw. skanowanie whisk-broom. W technice tej można osiągać wysokie rozdzielczości, ponieważ skaner może skupić przez dłuższy czas się na jednym obszarze. Doktorant opracowanym stanowiskom nadał nazwy skanerów HSS-1020 oraz HSS-400. Ich konstrukcje wraz z odpowiednimi schematami budowy zostały zaprezentowane i opisane dokładnie w podrozdziale 7.2. W swojej metodologii badawczej doktorant przyjął dwa kluczowe podejścia do klasyfikacji obiektów: operacje klasyfikacji na oryginalnych, niezredukowanych wymiarowo danych wejściowych oraz operacje klasyfikacji na danych zredukowanych wymiarowo. W pracy doktorant przeanalizował dwie najczęściej spotykane metody klasyfikacji obiektów, tj. klasyfikację nienadzorowaną oraz nadzorowaną. W przypadku klasyfikacji nienadzorowanej przetestował klasteryzację metodą centroidów *k-mean* oraz modeli mieszanek Gaussowskich - Gaussian Mixture Model (GMM), natomiast jeżeli chodzi o klasyfikację nadzorowaną, wykorzystał on klasteryzację metodą drzew decyzyjnych *random forest*. Redukcję wymiarowości autor wykonywał z wykorzystaniem dwóch metod: głównych składowych - PCA (*Principle Component Analysis*) oraz liniowej analizy dyskryminacyjnej - LDA (*Linear Discriminant Analysis*). W całej pracy znajdują się tabele systematyzujące i zestawiające zbiorczo większość analizowanych przez autora przypadków dla różnych parametrów. W rozdziale siódmym przykładem takiej tabeli jest macierz eksperymentów do badania wydajności i skuteczności przetwarzania i analizy na podstawie wybranych w pracy zestawów danych HSI, opisująca wszystkie przypadki klastrowania oraz na podstawie rodzajów wykorzystanej klasyfikacji bez i z redukcją wymiarową, odpowiednio metodą PCA i LDA. Łącznie jest to dziewięć osobnych eksperymentów, a ich zestawienie w formie tabelarycznej na samym początku podrozdziału 7.3.2 wraz ze schematami poszczególnych rodzajów eksperymentów jest bardzo praktycznym zabiegiem i wprowadza znaczne uporządkowanie w strukturę całej pracy. W tym miejscu stwierdzam, że przejrzystość pracy oraz przedstawienie treści i strona edycyjna pracy są na bardzo wysokim poziomie i zdecydowanie ułatwiają jej lekturę. Jest to niezwykle istotne, ponieważ np. łączna liczba doświadczeń zawierała dziewięć eksperymentów w dwóch odmianach na siedmiu zestawach danych co daje łącznie 126 osobnych eksperymentów. Przy tej liczbie przejrzystość opisu różnic pomiędzy poszczególnymi eksperymentami jest kluczowa. Wyniki eksperymentów zawierają także analizę badania skuteczności dla poszczególnych etapów na opisanych wcześniej zestawach danych, przy czym autor przedstawia obrazy oryginalne, rezultaty klasyfikacji, wykorzystane w celach porównawczych prawdy podstawowe oraz metryki skuteczności IoU (*Intersection over Union*). Autor przelicza mierzony czas przetwarzania na tzw. czas dostosowany, przy czym dzieli tę wartość na całkowitą wartość pikseli uwzględniając ilość pikseli na kanał oraz ilość kanałów. Jest to zatem tzw. czas znormalizowany i uwzględniający złożoność danych. Wyniki badania wydajności algorytmów przetwarzania danych w klasyfikacji z wykorzystaniem klastrowania *k-means* z redukcją LDA wykazały, że czas znormalizowany dla zbioru *Salinas-A* jest średnio 2-krotnie większy w porównaniu z pozostałymi zestawami danych. Autor wspomina o tym w komentarzu pod tabelą 7.12, ale jest to jedynie stwierdzenie tego faktu. Powstaje jednak pytanie czy autor zastanawiał się nad przyczyną? To zagadnienie powtórzyłem w moich pytaniach do doktoranta. Dla przykładu podobna – jak w przypadku pytania 10, ale dla innego zbioru – sytuacja występuje, jeżeli chodzi o dane uzyskane z wykorzystaniem klastrowania Gaussian Mixture Model. W wypadku zbioru *Salinas* czasy dostosowane są średnio 2-krotnie dłuższe w przypadku klasyfikacji bez redukcji wymiarowej. Tutaj natomiast znajdujemy już wyjaśnienie, że brak zastosowania redukcji wymiarowości znacznie wydłuża czas dalszego przetwarzania obrazów hiperspektralnych, co oczywiście związane jest z większą ilością danych do przetworzenia. Bardzo wartościowym elementem końcowym rozdziału siódmego są zestawione zbiorczo wnioski podsumowujące sformułowane na podstawie wszystkich wykonanych eksperymentów, a także zamieszczone za nimi wnioski końcowe. Taka struktura bardzo porządkuje pracę. Zakończenie każdego rozdziału tego typu podsumowania porządkuje pracę, dowodzi umiejętności analitycznego myślenia autora, powtarza najważniejsze konsekwencje wynikające z uzyskanych wyników i dowodzi profesjonalnego warsztatu naukowego autora.

W rozdziale ósmym stanowiącym *credo* poczynań naukowych doktoranta w ramach niniejszej rozprawy znajduje się opis wykonanych przez autora prac badawczych, dotyczących syntezy uproszczonych układów obrazowania spektralnego. Autor już na początku stwierdza, że w rozdziale tym zamieścił również dowód i wnioski na temat prawdziwości postawionej hipotezy badawczej. Stwierdzam, że jest to prawda, dodając również, że także rozdziały 5-7 są doskonałym dopełnieniem, a materiał w nich zawarty konsekwentnie służy udowodnieniu wspomnianej tezy. Jednym z najistotniejszych elementów tej części pracy jest z punktu widzenia naukowego zaproponowanie układu obrazowania o mniejszej liczbie kanałów spektralnych oraz stopniu skomplikowania, o większej odporności na drgania i zmiany temperatury, o uproszczonym układzie akwizycji, zmniejszonych wymaganiach radiometrycznych, a także ostatecznie o niższym koszcie. W rozdziale autor rozwiązał szereg problemów badawczych. Do najważniejszych należy analiza sposobu rozpoznawania kluczowych pasm spektralnych w obrazach HSI przez poszczególne algorytmy do redukcji wymiarowości i klasyfikacji wraz z określeniem klucza jakim przypisywane są wagi poszczególnym kanałom widmowym. Kolejnym istotnym problemem jaki autor rozwiązał i opisał w tym rozdziale jest określenie w jaki sposób skuteczność klasyfikacji zależy od szerokości okna widmowego oraz czy i w jaki sposób liczba kanałów widmowych wpływa na możliwość i skuteczność klasyfikacji, w szczególności chodzi tutaj o kanały, którym algorytm przypisuje najwyższe wagi. Kolejnym rozwiązywanym w ramach tego rozdziału problemem jest określenie najmniejszej liczby kanałów widmowych, do której można zredukować cały układ obrazowania tak, aby dalsze zwiększanie ich liczby nie powodowało zwiększania skuteczności klasyfikacji. Rozwiązanie tych problemów jest istotne również z punktu widzenia możliwości zmniejszenia wymagań dotyczących filtrów spektralnych stosowanych w rzeczywistych uproszczonych układach obrazujących i w efekcie zmniejszenie ich kosztu. Uważam, że bardzo pomocne w zrozumieniu algorytmu działania zaproponowanego przez autora są sporządzone przez niego schematy przedstawiające konwencjonalne podejście realizacji aplikacji z instrumentem HSI, oraz proponowane w rozprawie autorskie podejście do syntezy układów MSI, a także schematy przedstawiające sposób działania powstałego uproszczonego układu obrazowania spektralnego. Rozdział ten zawiera szereg wyników i płynących z nich wniosków o znaczeniu użytecznym. Przykładowo autor wykazuje, że realizacja fizycznego filtra spektralnego, bazującego na kanałach wskazanych przez metodę PCA może być trudna w realizacji i należy ten fakt brać pod uwagę podczas projektowania całego systemu obrazowania. W końcowej części podrozdziału 8.2 podana została prawidłowa diagnoza przyczyny tego zjawiska związana z niedopasowaniem kanałów spektralnych wskazywanych przez PCA oraz fizycznych kanałów kamery. Zaproponowany przez doktoranta algorytm dystrybucji wag nadawanych kanałom spektralnym opiera się na operacjach odszumiania i normalizacji, a następnie redukcji wymiarowości. W dalszej części budowany jest model klasyfikujący metodą Random Forest. W kolejnym etapie do danych wynikowych autor stosuje algorytm ekstrakcji wag nadanych poszczególnym kanałom spektralnym z pierwotnego, surowego obrazu HSI. W efekcie tego autor uzyskał tabele wartości wag dla poszczególnych zakresów widmowych, które ostatecznie porównuje ze sobą otrzymując wartości poszczególnych wag nadane kanałom spektralnym. Również w tym samym, ósmym, rozdziale autor analizuje wpływ liczby wybranych pasm spektralnych na skuteczność klasyfikacji. W wyniku przeprowadzonych badań doktorant wykazał, że dla sześciu spośród siedmiu zestawów hiperspektralnych, liczba klas wymaganych dla osiągnięcia wymaganej skuteczności klasyfikacji (na poziomie 95% !) wyniosła 4 lub mniej, natomiast w czterech przypadkach były to nawet tylko dwie klasy. Jest to niezwykle istotny wniosek, ponieważ w przypadku większości analizowanych danych stosunek minimalnej liczby kanałów spektralnych do liczby klas prawdy podstawowej wyniósł 0,3 i mniej. Płyne z tego kolejny niezwykle istotny wniosek o charakterze aplikacyjnym, że wymagana liczba kanałów spektralnych powinna wynosić nie mniej niż jedna trzecia liczby poszukiwanych klas. Możliwa jest redukcja obrazu hiperspektralnego do znacznie uproszczonej postaci multispektralnej, która pozwoli na poprawną klasyfikację obrazu i będzie nakierowana na konkretne zadanie detekcyjne. Kolejnym krokiem poczynań naukowych doktoranta opisanych w ramach rozdziału ósmego była analiza wpływu szerokości okna kanału na skuteczność klasyfikacji, a także propozycja syntezy uproszczonych układów obrazowania. To właśnie w podrozdziale 8.6 autor zamieścił ostateczną wersję autorskiego algorytmu syntezy uproszczonych układów HSI. Kolejną istotną częścią recenzowanej pracy doktorskiej jest podrozdział dotyczący aspektów aplikacyjnych, tj. weryfikacji wdrożeniowej metody syntezy uproszczonych układów obrazowania spektralnego. Autor omówił przykłady zastosowania opracowanej autorskiej metody syntezy w wybranej aplikacji zrealizowanej przez firmę Scanway S.A. dla klienta z branży spożywczej, tj. do wykrywania obecności ciał obcych na linii przetwarzania ryżu. Autor wykorzystał kamerę *Ximea XiSpec* z liniowymi filtrami Fabry-Perot naniesionymi bezpośrednio na sensor CMOS, co zapewniło wysoką częstotliwość rejestracji obrazów. Autor wykazał, że możliwości kamery hiperspektralnej można przełożyć na redukcję stopnia skomplikowania instrumentu multispektralnego, który może mieć wyłącznie trzy pasma, jeżeli będą one odpowiednio wyselekcjonowane. W tej części pracy autor przedstawił wyniki jednoznacznie świadczące o możliwości redukcji obrazów hiperspektralnych do pojedynczych przedziałów widmowych rozumianych jako kanały spektralne. Niewątpliwie dowodem na to są obliczenia numeryczne przeprowadzone przez Autora na zróżnicowanym zestawie obrazów HSI. Zaproponowanie przez autora układu zoptymalizowanej kamery multispektralnej stanowi zdecydowanie rozwiązanie ekonomiczne i jest niewątpliwie konkurencyjne w stosunku do kamer HSI, które ceny powodują znaczne wydłużenie zwrotu z inwestycji w ich zakup.

Uważam, że rozdziały siódmy oraz szczególnie ósmy rozprawy są najbardziej wartościowe, wnoszą nową

wiedzę w obszarze badań nad systemami obrazowania multispektralnego oraz zawierają wiele nieoczywistych i ważnych wniosków.

3. Ocena oryginalności rozprawy i aktualności poruszanej tematyki badawczej

Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Stanowi ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Oryginalnym dziełem autora jest niewątpliwie zaproponowanie docelowej metody syntezy uproszczonych układów obrazowania spektralnego. Tematyka ta jest ważna i aktualna z punktu widzenia możliwości implementowania opracowanej metody w aplikacjach klienckich przy zmniejszeniu kosztów i poziomu skomplikowania w stosunku do istniejących na rynku instrumentów hiperspektralnych. Dowodzi to oryginalności rozwiązanych przez autora problemów oraz aktualności tematyki badawczej poruszanej przez niego w ramach pracy. Aspekt innowacyjności i użyteczności zaproponowanego rozwiązania, szczególnie w kontekście spodziewanego upowszechnienia i szerokiego zastosowania opracowanej metody uproszczenia obrazowania spektralnego w technice zdecydowanie podnosi ocenę prowadzonych badań i uzyskanych wyników.

Za najważniejsze osiągnięcia doktoranta uważam:

1. Wykazanie, że opracowanie i wykorzystanie fizycznej reprezentacji operacji LDA jest niezwykle istotne z punktu widzenia optymalizacji instrumentów i łańcucha danych HSI.
2. Określenie w jaki sposób algorytmy redukcji wymiarowości i klasyfikacji definiują kluczowe pasma spektralne w obrazach HSI i jak kształtuje się dystrybucja wag poszczególnych kanałów.
3. Wykazanie, że liczba kanałów spektralnych o najwyższych wagach wpływa na możliwości klasyfikacji oraz określenie na drodze eksperymentalnej jaka jest najmniejsza liczba kanałów spektralnych, której przekroczenie nie wpływa już na skuteczność klasyfikacji.
4. Udowodnienie możliwości konstrukcji uproszczonego układu obrazowania, rozumianego jako instrumentu umożliwiającego wykorzystanie zredukowanej liczby okien spektralnych (kilku wybranych okien spektralnych zamiast np. kilkuset w przypadku obecnie stosowanych układów obrazowania HSI).
5. Udowodnienie, że w rzeczywistych układach obrazowania HSI liczba wymagana liczba kanałów spektralnych może wynosić nie mniej niż jedna trzecia liczby poszukiwanych klas.
6. Wykazanie, że w zależności od rodzaju obrazu i jego cech topograficznych, najlepsze rezultaty klasyfikacji są otrzymywane za pomocą różnych metod ekstrakcji pasm.
7. Sformułowanie docelowej metody syntezy uproszczonych układów obrazowania spektralnego.
8. Wykazanie, że możliwa jest redukcja obrazu hiperspektralnego do znacznie uproszczonej postaci multispektralnej, która będzie nakierowana na konkretne zadanie detekcyjne i pozwoli na poprawną klasyfikację obrazu.
9. Udowodnienie, że możliwości kamery hiperspektralnej można przełożyć na redukcję stopnia skomplikowania instrumentu multispektralnego, który może wykorzystywać jedynie trzy pasma, jeżeli będą one odpowiednio wyselekcjonowane.

Stwierdzam, że powyższe osiągnięcia wskazują niewątpliwie na posiadaną przez autora umiejętność samodzielnego prowadzenia prac naukowych, dowodzą oryginalności rozprawy i aktualności poruszanej tematyki badawczej.

4. Uwagi krytyczne, pytania

Pod względem edycyjnym praca zredagowana jest bardzo dobrze. Nie zawiera większych nieścisłości czy też błędów składu. Do opiniowanej pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Jędrzeja Kowalewskiego recenzent zgłasza następujące pytania:

1. Autor już w rozdziale 3.3 stwierdza, że sensory mozaikowe prawdopodobnie utworzą drogę kamerom hiperspektralnym w użytku codziennym. Brakuje w tym miejscu jednak argumentacji. Czy autor mógłby rozwinąć to stwierdzenie? (mając na uwadze również przeszkody technologiczne, typu skomplikowane układy przetwarzania danych, konieczność kalibracji, skończona i ograniczona liczba pasm).
2. Skąd wynika brak wartości pola widzenia (FOV) w tabeli 3.5 przy niektórych rozwiązaniach komercyjnych? Czy producenci nie podają tego parametru w notach katalogowych?
3. Rysunek 6.2 przedstawia charakterystyki przestrzenno-spektralne elementu wykorzystywanego do filtracji światła, natomiast brakuje na nim oznaczenia kolorów, tj. legendy w postaci mapy barw.
4. Czy badane struktury dyfrakcyjne w postaci siatek transmisyjnych były jednorodne? Tzn. czy posiadały one taką samą amplitudę/wysokość rowków na ich długości? Czy były to może elementy, które zostały poddane tzw. apodyzacji, tj. wygładzeniu tej amplitudy na krańcach siatki?

5. Autor w rozdziale 6.4 zestawia charakterystyki szerokości połówkowej maksimum transmitancji w funkcji położenia włókna światłowodu zbierającego i stwierdza, np. analizując rys. 6.27, że FWHM zmieniała się od 6 nm do 10 nm z medianą na poziomie 8,6 nm. Powstaje pytanie co z tego wynika? Czy zmiany te były porównane dla elementu o innej częstotliwości zmian rowków np. równej 300 r/mm?
6. Autor w rozdziale 6.6 stwierdza, że badany przez niego filtr LVF posiada – podobnie jak opisane siatki dyfrakcyjne – liniową zależność pomiędzy przesunięciem względem włókna optycznego rejestrującego a położeniem maksimum plików transmitancji (rys. 6.32). Lepszym sformułowaniem wydawałoby się stwierdzenie, że zależność ta nie jest liniowa, a jest ona zbliżona do liniowej z błędem nieliniowości na poziomie $\delta_{nl} = \dots \%$, jest to jedynie sugestia i nie wymaga odpowiedzi doktoranta w tym zakresie.
7. Analizując rysunek 6.33 przedstawiający szerokość połówkową maksimum transmitancji w funkcji położenia filtra LVF względem włókna optycznego powstaje pytanie skąd wynika taki rozrzut wartości FWHM w zależności od położenia filtra? Ciekawym aspektem byłoby znalezienie przyczyny nagłego wzrostu tego rozrzutu po przekroczeniu położenia filtra powyżej wartości 12 mm?
8. Autor stwierdza, że wąski zakres spektralny filtrów LVF w stosunku do innych elementów filtrujących w układach spektrofotometrycznych może być zarówno wadą jak i zaletą. To bardzo ciekawe zagadnienie. Czy autor mógłby wskazać, gdzie cecha taka będzie wpływała korzystnie na pracę całego układu, a gdzie (w którym/których zastosowaniach) negatywnie.
9. Czy wyniki klasyfikacji zestawione w tabeli 7.7 w przypadku eksperymentu 5 i 6 wykonywane były z zastosowaniem redukcji wymiarowej? Wskazuje na to macierz 7.5, jeżeli tak, to oznaczałoby to błędny nagłówek w tabeli 7.7.
10. Wyniki badania wydajności algorytmów przetwarzania danych w klasyfikacji z wykorzystaniem klastrowania *k-means* z redukcją LDA (eksperyment 3) przedstawione w tabeli 7.10 wykazały, że czas znormalizowany (dostosowany – za autorem) dla zbioru Salinas-A jest średnio 2-krotnie większy w porównaniu do pozostałych zestawów. Autor wspomina o tym w komentarzu pod tabelą 7.12, ale jest to jedynie stwierdzenie tego faktu. Powstaje pytanie czy autor zastanawiał się nad przyczyną? Odpowiedzią są tutaj zapewne różne zakresy spektralne. Poproszę w tym miejscu o komentarz autora.
11. Autor w rozdziale 8 przeanalizował metody redukcji wymiarowości PCA oraz LD ze względu cyt. „...różne podejście w algorytmach obu metod, co może przełożyć się na różny sposób produkcji docelowych fizycznych filtrów spektralnych.” Ma to daleko idące aspekty praktyczne i wymagałoby komentarza, czy autor mógłby rozwinąć to stwierdzenie podczas obrony publicznej?
12. Autor dowodzi, że dla pewnej liczby pasm, tj. pomiędzy 15 a 20, wraz z dalszym wzrostem ich liczby, skuteczność klasyfikacji nie rośnie znacząco, badania wykonane w podrozdziale 8.4 zdecydował się przeprowadzić dla liczby n pasm zredukowanej od $n=30$ do $n=1$. Jest to zasadne, ale powstaje pytanie co może być przyczyną takiej saturacji skuteczności klasyfikacji. Dlaczego po osiągnięciu pewnego progu wartość skuteczności klasyfikacji ulega nasyceniu?
13. Skąd wynika kilkuprocentowy nagły skok wartości dopasowania klas po klasyfikacji do prawdy podstawowej dla pasma wybranego przez algorytm LDA, pojawiający się dla liczby kluczowych pasm spektralnych równej ok. 23 – jest to widoczne na rys. 8.10? Jest on widoczny jedynie w przypadku zbioru *Platki-01*.

5. Ocena analizy źródeł

Przegląd źródeł literaturowych obejmuje łącznie 107 pozycji. Cytowane artykuły dotyczą głównie zagadnień związanych z opracowaniem elementów i matryc CCD, multi i hiperspektralnym sensorami CMOS oraz algorytmami przetwarzania danych multispektralnych. Stwierdzam, że tematyka poruszana przez doktoranta jest aktualna, literatura cytowana jest w sposób prawidłowy, a jej zakres wiąże się ściśle z tematyką pracy. Na uwagę zasługuje aktualność źródeł i poruszanej w pracy tematyki. Przykładowo 11 prac cytowanych przez autora pochodzi z roku 2025.

6. Podsumowanie

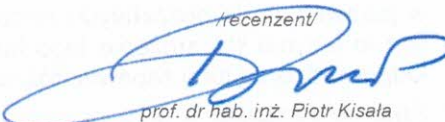
Recenzowana rozprawa dotyczy akwizycji, przetwarzania i analizy danych pochodzących z układów obrazowania hiperspektralnego pod kątem ich zastosowania w dalszych badaniach naukowych oraz aplikacjach przemysłowych. Tematyka pracy jest aktualna, a sama praca ma wiele aspektów aplikacyjnych. Autor opracował metodologię obrazowania i przetwarzania danych spektralnych wskazując możliwość jej aplikacji, w zależności od specyfiki, dla wielu typów badanych obiektów. Autor wykazał, że 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. Jednocześnie udowodnił, że jest to możliwe po odpowiednim doborze pasm i wykorzystaniu zaawansowanych metod przetwarzania danych. Niniejszym stwierdzam, że zasadna, nieoczywista i sformułowana prawidłowo

teza pracy, została udowodniona.

Recenzowana praca jest kompletna, zawiera zarówno dobrze wykonaną część analityczną, jak i poparte dogłębną analizą literatury przedmiotu badania numeryczne i eksperymentalne. Dodatkowo, wyniki recenzowanej rozprawy zostały już wdrożone w Scanway S.A. w ramach tzw. Doktoratu Wdrożeniowego.

Reasumując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Jędrzeja Kowalewskiego „*Metodologie akwizycji, przetwarzania i analizy optycznych danych hiperspektralnych w aplikacjach przemysłowych, kosmicznych, górniczych i rolniczych*” spełnia wymogi Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2024 r., poz. 1571) stawiane pracom doktorskim w odniesieniu do oryginalności problemu naukowego, umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wiedzy teoretycznej. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr. inż. Jędrzeja Kowalewskiego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Jednocześnie uwzględniając fakt, że doktorant posiada w swoim dorobku opracowanie techniczne wdrożonego w praktyce przemysłowej, tj. w polskiej firmie działającej w branży technologii obserwacyjnej i wizji maszynowej - Scanway S.A., przy czym rozwiązanie to jest ściśle związane z bronią rozprawą doktorską oraz biorąc pod uwagę spełnienie przesłanek, o których mowa w § 1 pkt a) Uchwały nr 81/3/RDN02/2021-2024 Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektro-technika i Technologie Kosmiczne z dnia 18 listopada 2024 r. w sprawie zaopiniowania Zasad wyróżniania rozpraw doktorskich w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne wnioskuję o wyróżnienie przedmiotowej rozprawy doktorskiej.

recenzent/

prof. dr hab. inż. Piotr Kisala