

## Raport z realizacji projektu

# “Głowica do klasyfikacji danych hiperspektralnych w czasie rzeczywistym metodą przyrostowego uczenia”

realizowanego w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Mazowieckiego na lata 2014-2020 (RPO WM 2014-2020)

Numer wniosku: RPMA.01.02.00-14-a162/18

### Wstęp

Poniższy raport prezentuje osiągnięte wyniki oraz proces badawczy do nich prowadzący. Raport został zredagowany w taki sposób, aby zapewnić Beneficjentowi bezpieczeństwo w zakresie praw własności intelektualnej do kluczowych rozwiązań i opracowanych algorytmów i jednocześnie przedstawić zakres prac zrealizowanych w ramach projektu. Dane wrażliwe zostały pominięte lub opisane zdawkowo.

### Przebieg prac

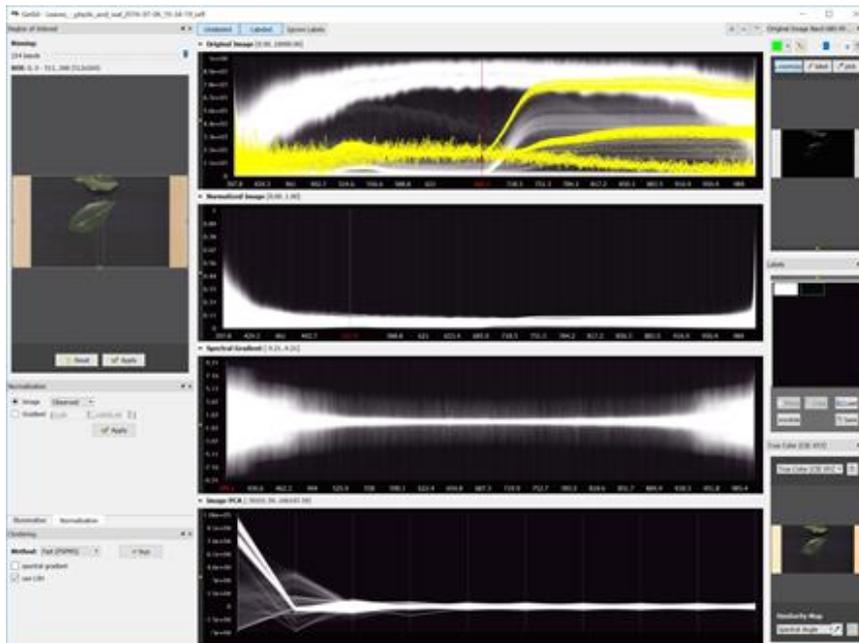
Pierwszym zagadnieniem było rozpoznanie aktualnych formatów w jakich przedstawiane są dane hiperspektralne. Bez prawidłowego otwierania danych niemożliwa byłaby weryfikacja poprawności uzyskiwanych wyników. Większość zbiorów danych hiperspektralnych dostarcza albo szereg obrazów reprezentujących kolejne pasma bądź plik w formacie *ENVI*.

Pierwsza reprezentacja jest o tyle wygodna, że dane zapisane są w formacie czytelnym dla człowieka, natomiast ze względu na kompresję czy zmianę na zakres odpowiadający zakresowi barw na obrazie, jest on mniej reprezentatywny.

Na format *ENVI* składają się nagłówek, który opisuje plik z danymi oraz trójwymiarowa tablica danych, w którym znajdują się obrazy przedstawiające poszczególne długości fali. W pliku nagłówka znajdują się takie informacje jak liczba długości fali, ich konkretne długości oraz wielkości obrazu, typ reprezentowanych danych itd.

W przypadku pierwszej reprezentacji ilość rejestrowanych warstw (długości fali) była znacząco mniejsza (ok. 16), co jest wartością znacząco mniejszą od danych, które były dostępne w drugim z formatów (396 długości fali).

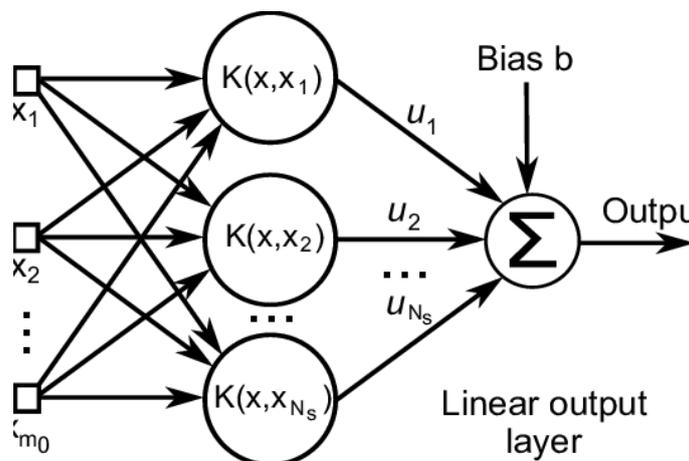
Do pracy z zarejestrowanymi danymi przetestowano szereg aplikacji użytkowych, dostępnych na rynku. Oprogramowanie pozwoliło sprawnie przeglądać spektra, weryfikować poprawność kompletu danych czy porównywać zbiory danych.



Rys. 1 Przykładowe okno aplikacji Gerbil do pracy na danych hiperspektralnych

Następnie opracowano i zaimplementowano metodę IBHM. Metoda ta ma skuteczny potencjał predykcyjny przy zachowaniu względnie małego modelu. Do uczenia metody potrzebny jest spory nakład obliczeniowy. Jednakże, z uwagi, że nauka modeli jest przeprowadzana „offline”, nie stanowi to zasadniczego problemu, a jedynie niedogodność. Członkowie zespołu zajmującego się implementacją nowej metody dokładnie zapoznali się z proponowaną metodą i wiedzą, jak można ją zastosować dla danych hiperspektralnych. Opracowana i zrealizowana została metoda klasyfikacji włączając implementację oraz analizę statystyczną.

Sama metoda czerpie inspirację z sieci neuronowych. Jednak zamiast tworzyć głębokie modele, tworzy modele szerokie (podobnie jak metody typu *Support Vector Machine*). Modele te, w odróżnieniu od SVM uczone są w sposób wielokrotnej optymalizacji, a nie określania stricte hiperpłaszczyzny. Na schemacie (Rys. 2) widać strukturę modelu.



Rys. 2 Struktura funkcji aproksymującej [1]

Analiza obejmowała zasadniczo: czas wykonania algorytmu (zarówno czas trenowania jak i czas predykcji), statystyczne wskaźniki tych czasów (średnia, odchylenie standardowe, wartość minimalna, maksymalna), dokładność (*accuracy*), czułość (*recall*), precyzję (*precision*). Zbadano, czy wyniki uzyskiwane przez algorytm (w ramach klasyfikacji) są zbieżne i nie mają nieoczekiwanie dużego odchylenia standardowego. Zarówno w kontekście metody jak i konfrontacji z istniejącymi algorytmami. Testy realizowano zarówno na danych symulowanych jak i ogólnodostępnych. Przykładem testu jest klasyfikacja i sprawdzenie poprawności przypisania danego piksela obrazu ze zdjęć hiperspektralnych do odpowiedniego znacznika kolorystycznego zawartego w Color Checker (24C-4300). Do testów wykorzystano m.in. istniejące metody klasyfikujące w we wspomnianej bibliotece jako punkt odniesienia. Jeśli nie wyszczególniono inaczej, parametry uczenia i metody były brane domyślne.

Nazwa metody	Średni czas trenowania (s)	Średni czas testowania (s)	Średnia skuteczność
metoda 1	0,143	0,715	0,7524
metoda 2	11,631	0,043	0,9745
metoda 3	0,435	3,856	0,9973
metoda 4	100,475	0,227	0,9807
metoda 5	35,407	4,001	0,1653
Proponowana	1128,120	0,702	0,9722

Tabela 1 Wyniki dla klasyfikatorów z ręcznym ustawieniem parametrów dla obrazu z Color Checkerem (24C-4300) dla zredukowanej liczby wymiarów do 20. Porównanie wybranych metod oraz metody proponowanej. Nazwy przedstawionych metod dostępne u Beneficjenta.

Nazwa metody	Średni czas trenowania (s)	Średni czas testowania (s)	Średnia skuteczność
metoda 1	1,369	2,426	0,6180
metoda 2	48,240	0,191	0,9336
metoda 3	10,682	257,688	0,9658
metoda 4	38,413	1,651	0,4902
metoda 5	225,425	3,248	0,7274
Proponowana	2365,502	0,832	0,9227

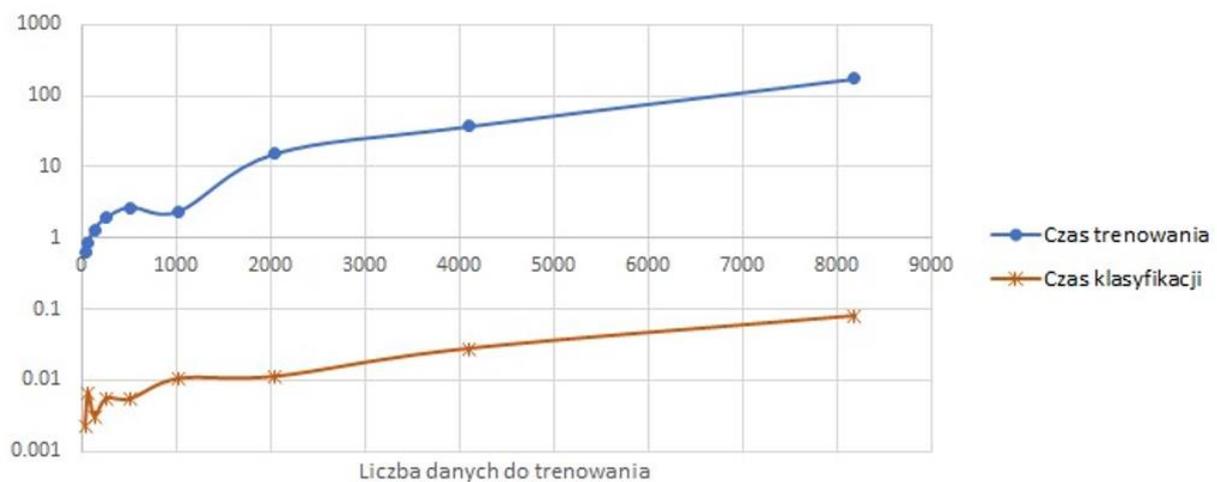
Tabela 2 Wyniki dla klasyfikatorów z ręcznym ustawieniem parametrów dla obrazu z pomarańczami (RvF Oranges 6500). Nazwy przedstawionych metod dostępne u Beneficjenta.



Wielkość zbioru do trenowania	Średni czas uczenia [s]	Odchylenie std.[s]	Średni czas klasyfikacji [s]	Ochylenie std. [s]
32	0,64	0,22	0,0022	0,0014
64	0,86	0,24	0,0065	0,0054
128	1,32	0,52	0,0030	0,0017
256	1,91	0,63	0,0054	0,0033
512	2,70	0,76	0,0075	0,0053
1024	2,35	1,49	0,0104	0,0074
2048	15,48	9,99	0,0111	0,0027
4096	37,45	7,23	0,0275	0,0030
8192	188,02	45,23	0,798	0,0084

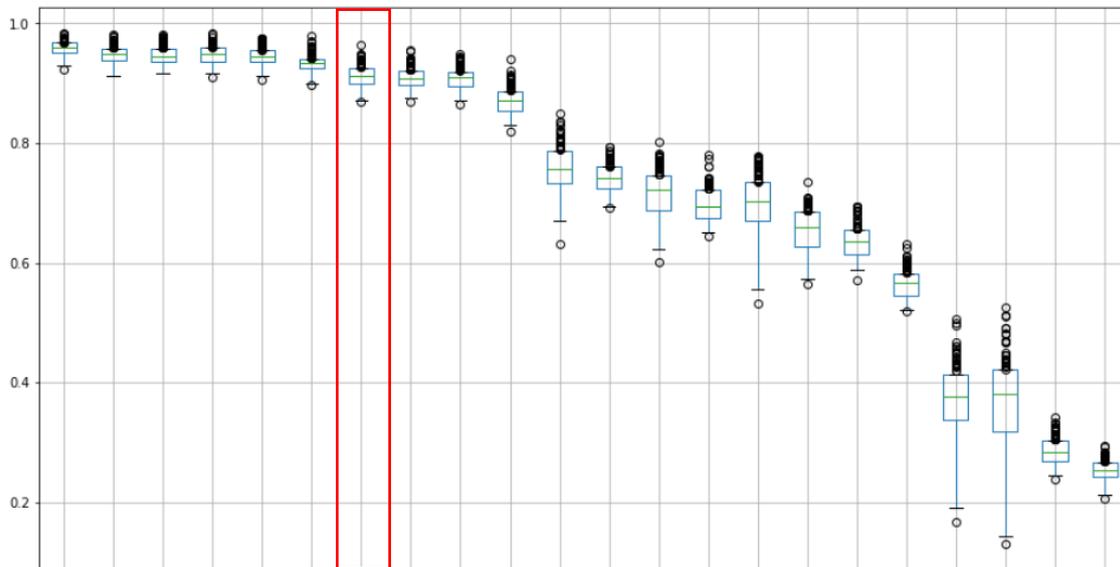
Tabela 3 Zestawienie wyników czasowych dotyczące trenowania i klasyfikacji proponowanej metody, rozmiar problemu dotyczy liczby hiper-pikseli

### Porównanie czasu trenowania i czasu klasyfikacji



Rys. 3 Porównanie czasu trenowania i czasu klasyfikacji. Pionowa oś to czas w sekundach.

Do realizacji testów korzystano z narzędzi w środowiskach m.in. Python, R oraz Excel.



Rys. 4 Porównanie F1-score dla wiodących metod zawartych w bibliotece oraz proponowanej metody; wiele kolumn o analogicznej nazwie oznacza tę samą metodę, ale z innym zestawem parametrów. Nazwy przedstawionych metod dostępne u Beneficjenta. Proponowana metoda zaznaczona czerwonym prostokątem.

Metoda nie daje najlepszych rezultatów, jednak nie odstaje od wiodących metod. Z kolei zbieżność wyników metody również nie odstaje od wiodących metod. Odchylenie standardowe czasów wykonania jest o rząd wielkości mniejsze od średniego czasu (dla rozmiarów od 2048 hiper-pikseli). Odchylenie standardowe dla czasu uczenia jest spore względem średniego czasu uczenia, ale proces uczenia i tak jest czasochłonny.

Podstawowym ograniczeniem metody jest czasochłonność operacji uczenia modelu. Jest zauważalnie większa od typowych metod klasyfikacji. A dla zbiorów uczących o znacznym rozmiarze potrafi stać się niepraktyczna. Z tego powodu konieczne jest (przy dużych zbiorach danych) redukcja wymiarowości spektralnej oraz redukcja zbioru danych przestrzennie. To pierwsze realizuje się w naturalny sposób: usunięcie pasm, które nie niosą potrzebnych informacji lub za pomocą algorytmów typu PCA. Algorytmy PCA są nieco bardziej uniwersalne i pozwalają nie podejmować decyzji o wybranych pasmach. Drugi problem (redukcja przestrzenna) może być również wynikiem naturalnej metody filtrowania (np. wygładzania: uśredniającego, gaussowskiego itp).

W ramach dalszych prac metoda była doskonalona na podstawie weryfikacji na rzeczywistych danych.

W celu posiadania podstawowego progu, który musi osiągnąć innowacyjna metoda klasyfikacji, stworzono platformę testową dla danych hiperspektralnych. Stworzony program uruchamia szereg algorytmów na różnych zbiorach danych. Do stworzenia platformy wykorzystano język Python oraz szereg bibliotek m.in. sklearn, hyperopt. W ramach testów sprawdzono parę różnych metod do klasyfikacji w tym: K-Neighbours, Drzewa decyzyjne, Lasy losowe, MLP, AdaBoost, Naive Bayes, XGBClassifier, LGBM, CatBoost na różnych obrazach hiperspektralnych. Większość klasyfikatorów osiągała wynik (*accuracy*) powyżej 90%. Część z nich natomiast była zbyt wolna dla zastosowań komercyjnych, gdzie wymagamy czasów analizy znacznie poniżej sekundy. W czasie pierwszych testów nie uwzględniono zależności przestrzennych. Klasyfikowane były tylko hiper-piksele. Pierwsze walidacje nie uwzględniały też filtrowania czy wyboru konkretnych długości fal – nie były specjalizowane pod konkretny typ produktu. Stąd też zastosowanie PCA.

Sprawdzone zostało też, jak wymiarowość danych wpływa na precyzję klasyfikacji oraz na czasy działania. Wykorzystany został do tego algorytm PCA. Jak można było przypuszczać, czasy treningu jak i testowania zmalały. Skuteczność wraz ze zmniejszaniem wymiarowości wzrastała do pewnego stopnia. Na niektórych klasyfikatorach zysk wynosił nawet około 4 punktów procentowych. Mniej jest to widoczne na metodach bardziej zaawansowanych takich jak XGBClassifier.

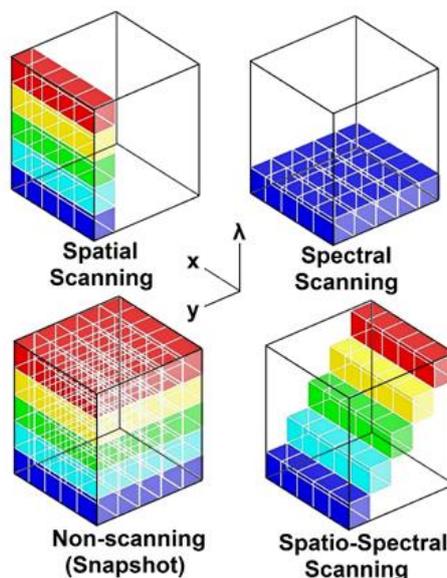
Ostatnim przeprowadzonym testem w czasie trwania tego zadania było sprawdzenie biblioteki do automatycznego dostosowywania hiperparametrów klasyfikatorów. Główny zysk pochodzący z zastosowania danej biblioteki pochodził z zaoszczędzonego czasu na dobór manualny parametrów. Precyzja dla większości metod była podobna.

Dokonano analizy dostępnych metod obrazowania hiperspektralnego pod kątem przydatności do wykorzystania w opracowywanej głowicy.

Istnieją trzy zasadnicze metody uzyskiwania graniastostupa danych hiperspektralnych  $x$ ,  $y$ ,  $\lambda$  (gdzie  $x$ ,  $y$  reprezentuje przestrzenne położenie piksela, a  $\lambda$  informacje spektralne jako intensywności dla określonych długości fali).



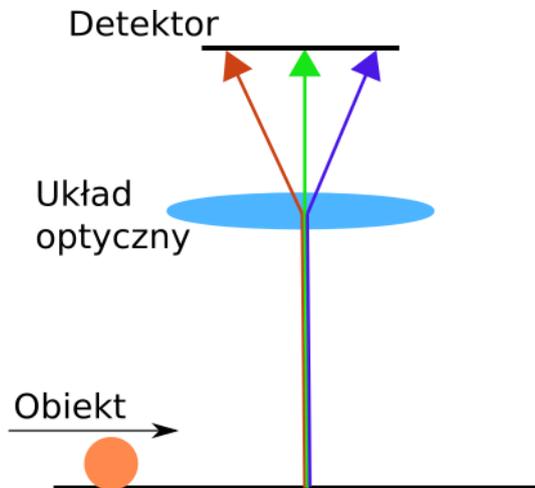
Rys. 5 Porównanie obrazów uzyskanych różnymi metodami obrazowania hiperspektralnego  
(źródło: [https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperspectral\\_imaging](https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperspectral_imaging))



Rys. 6 Porównanie danych uzyskanych z różnych metod obrazowania  
(źródło: [https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperspectral\\_imaging](https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperspectral_imaging))

### Skanowanie przestrzenne (Spatial scanning)

Istotą tej metody jest zbieranie kompletnej informacji spektralnych dla jednego przekroju analizowanego obiektu płaszczyzną obrazowania.

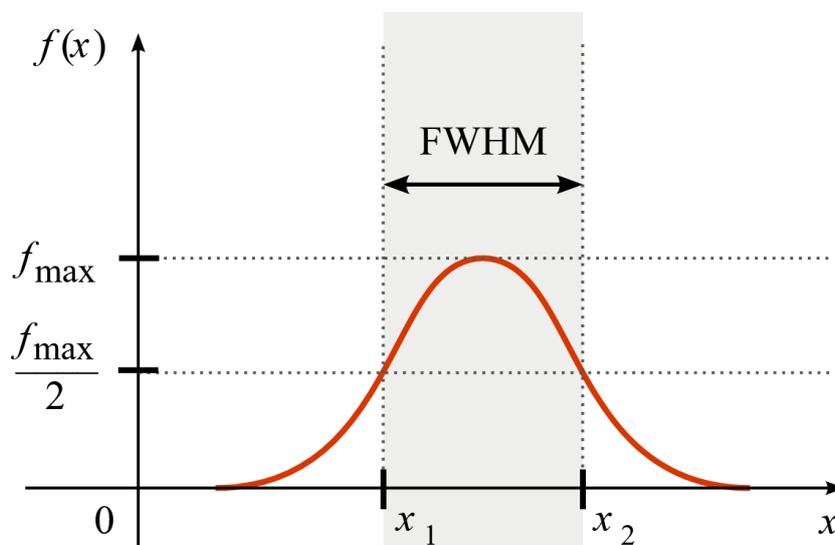


Rys. 7 Schemat działania kamery obrazującej z wykorzystaniem techniki skanowania spektralnego

Rys. 7 prezentuje zasadę działania kamery. Na detektor trafia światło rozszczerzone przez optykę obiektywu. Wiersze sensora reprezentują intensywność dla konkretnych długości fali podczas gdy kolumny informacje dla poszczególnych punktów przekroju. Sensor nie posiada filtrów pasmowo-przepustowych na swojej powierzchni. W celu zebrania pełnych informacji o obiekcie konieczny jest wzajemny ruch obiektu i kamery.

Zaletą tej metody obrazowania jest fakt, że zbierane są kompletne dane spektralne dla danego przekroju. Oznacza to, że możliwe jest przeprowadzenie analizy po zebraniu każdej linii. Jest to kluczowe jeżeli do analizy zamierza wykorzystać się frame grabber z układem FPGA.

Uzyskiwane są dane spektralne o bardzo wysokiej rozdzielczości. Szerokość połówkowa (FWHM) dla kamery FX10 firmy Specim wynosi 5,5 nm.



Rys. 8 Graficzna reprezentacja szerokości połówkowej (źródło: [https://en.wikipedia.org/wiki/Full\\_width\\_at\\_half\\_maximum](https://en.wikipedia.org/wiki/Full_width_at_half_maximum))

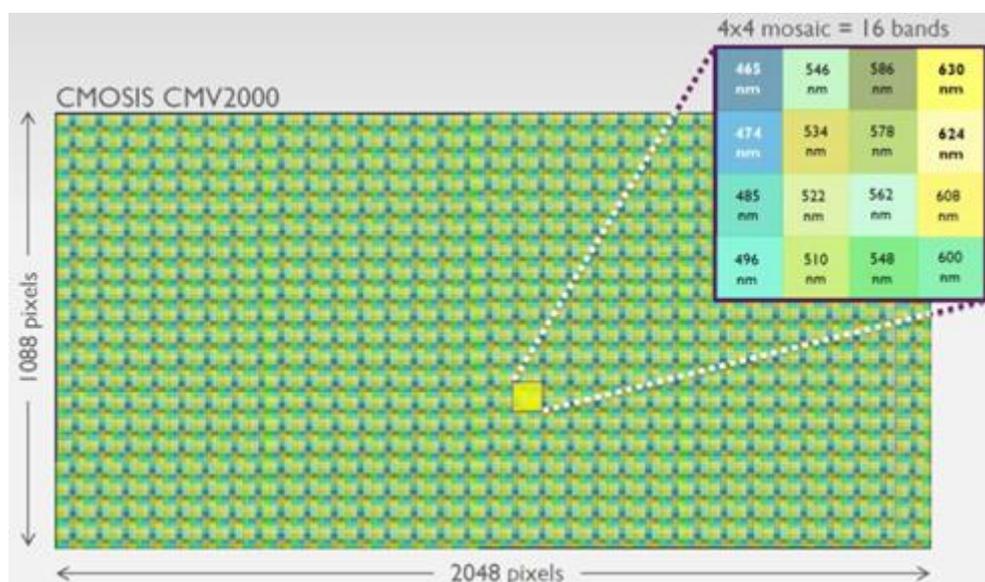
Skanowanie przestrzenne wymaga oświetlenia jedyni wąskiego obszaru (przekroju obiektu płaszczyzną skanowania).

### Skanowanie spektralne (Spectral scanning)

Istotą tej metody jest zbieranie pełnych danych o scenie dla konkretnej długości fali. Może być to realizowane zarówno z wykorzystaniem sensora liniowego jak i obrazowego. W celu zebrania informacji o więcej niż jednej długości fali konieczne jest wykonanie wielu zdjęć za każdym razem zmieniając filtr pasmowo przepustowy przed obiektywem. Istnieją rozwiązania z rewolwerowymi mocowaniami filtrów pasmowo-przepustowych umożliwiające zautomatyzowane ich przełączanie. W celu zebrania kompletnych danych spektralnych konieczne jest zapewnienie braku przemieszczeń kamery względem obserwowanego obiektu.

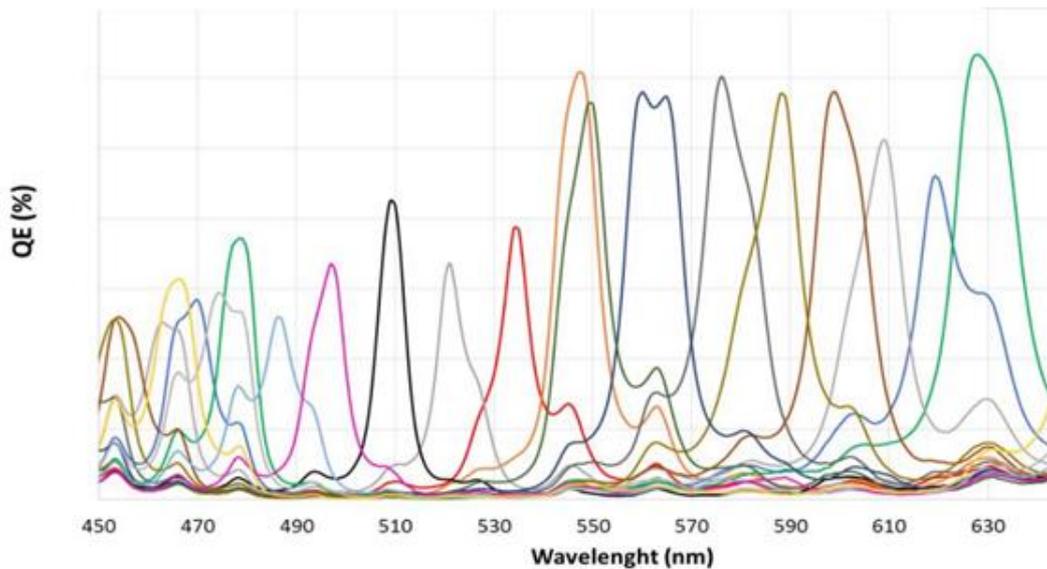
### Sensory mozaikowe (Snapshot)

Ten typ obrazowania zbliżony jest do wykonania zdjęcia kolorową kamerą matrycową z filtrem Bayera.



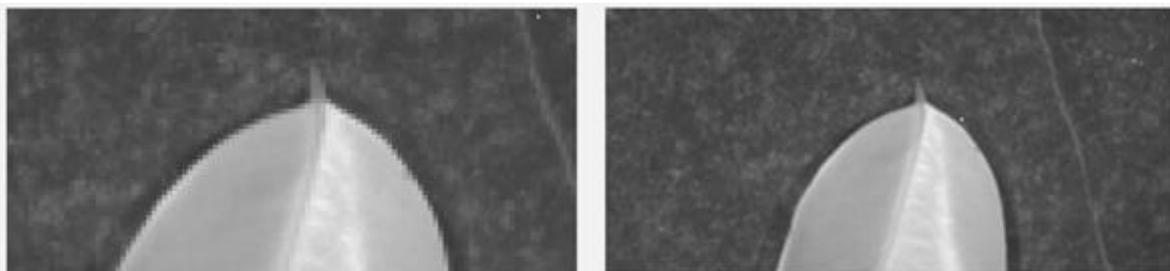
Rys. 9 Matryca mozaikowa z jądrem 4x4

(źródło: [https://www.ximea.com/support/attachments/4675/XIMEA\\_imec\\_HSI\\_technology-Part-V1.1.pdf](https://www.ximea.com/support/attachments/4675/XIMEA_imec_HSI_technology-Part-V1.1.pdf))



Rys. 10 Efektywność kwantowa w funkcji długości fali sensora mozaikowego Imec z jądrem 4x4  
(źródło: <https://spie.org/Documents/Industry%20relations/HSI%20imec%20for%20SPIE%20Baltimore%202016.pdf>)

Kamery tego typu charakteryzują się niską rozdzielczością przestrzenną i spektralną. W zależności od rozmiaru jądra dysponują 16 lub 25 filtrami pasmowymi. Sensor Imec z filtrami dla światła z zakresu fal 465-630nm zapewnia pomiar 16 filtrami o szerokości połówkowej ok 15nm. Rzeczywista rozdzielczość przestrzenna kamery z jądrem 4x4 i sensorem bazującym na CMV2000 wynosi jedynie 512 × 272 pikseli. Możliwe jest zastosowanie interpolacji w celu uzyskania natywnej rozdzielczości sensora. Jest to jednak jedynie przybliżenie i tak naprawdę nie uzyskuje się pełnej informacji o każdym pikselu obrazu.

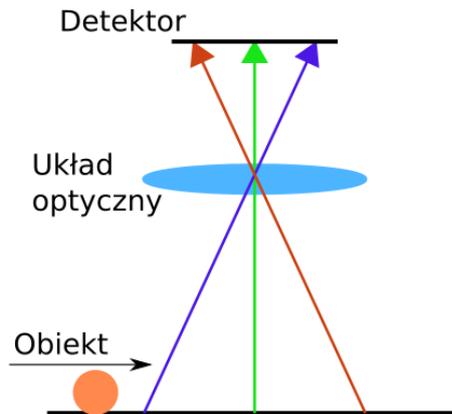


Rys. 11 Porównanie rzeczywistych (po lewej) i interpolowanych (po prawej) danych przestrzennych  
(źródło: <https://www.ximea.com/support/attachments/5981/SpectroNet-2016-03-Ximea-V02.pdf>)

W celu uzyskania obrazu nie jest wymagany ruch obiektu względem matrycy. Każde pobrane zdjęcie prezentuje pełną informację (zarówno powierzchniową jak i spektralną) o scenie. W celu uzyskania obrazu konieczne jest równomierne oświetlenie całej obserwowanej sceny.

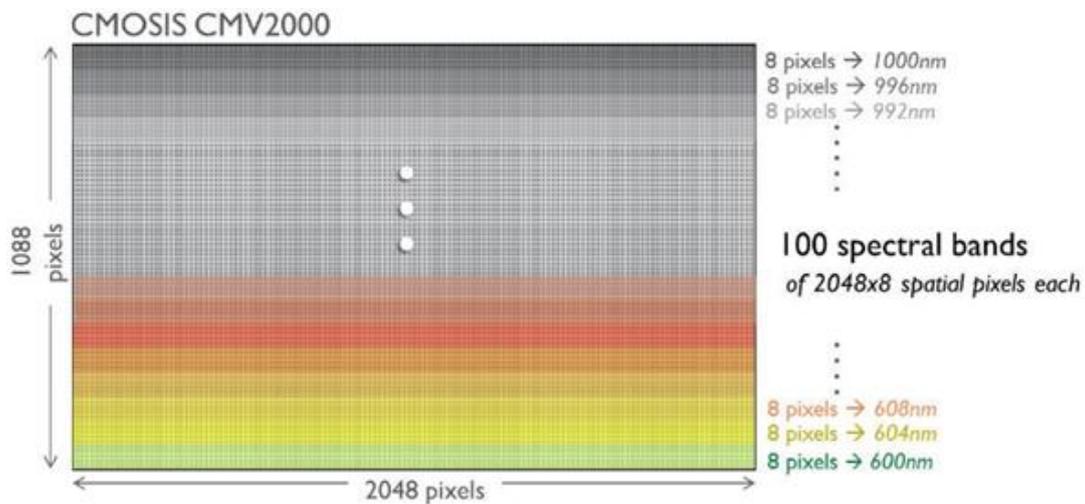
#### **Skanowanie przestrzenno-spektralne (Spatio-Spectral scanning)**

Istotą skanowania w tej metodzie jest akwizycja całej sceny na zdjęciu, przy czym dla każdego przekroju otrzymywana jest informacja jedynie o jednej długości fali. W celu zebrania pełnej informacji o scenie konieczny jest wzajemny ruch obiektu względem matrycy oraz wykonanie takiej ilości zdjęć jaka jest wymagana rozdzielczość spektralna.

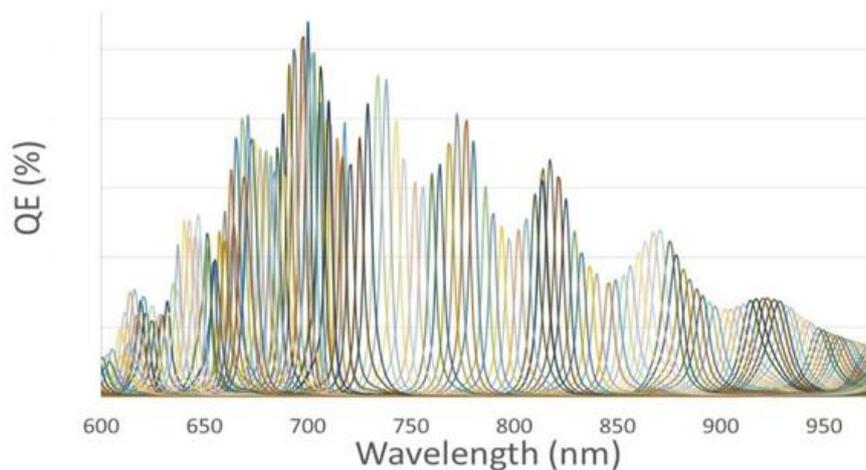


Rys. 12 Schemat działania kamery obrazującej z wykorzystaniem techniki skanowania przestrzenno- spektralnego

W celu uzyskania obrazu konieczne jest równomierne oświetlenie całej obserwowanej sceny.



Rys. 13 Organizacja matrycy kamery skanującej w technologii przestrzenno-spektralnej na przykładzie produktu firmy Imec (źródło: [https://www.ximea.com/support/attachments/4675/XIMEA\\_imec\\_HSI\\_technology-Part-V1.1.pdf](https://www.ximea.com/support/attachments/4675/XIMEA_imec_HSI_technology-Part-V1.1.pdf))



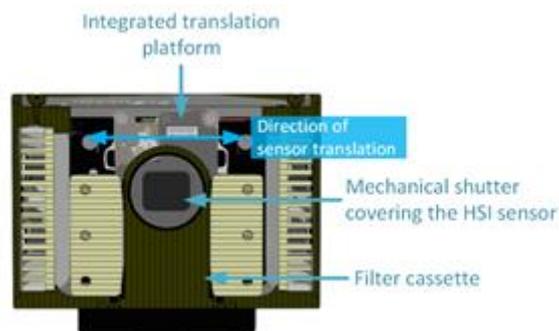
Rys. 14 Efektywność kwantowa w funkcji długości fali sensora liniowego (bazującego na matrycy CMV2000) wyposażonego w 100 filtrów BP (źródło: <https://spie.org/Documents/Industry%20relations/HSI%20imec%20for%20SPIE%20Baltimore%202016.pdf>)

## Skanowanie przestrzenno-spektralne - kamera liniowo obrazowa

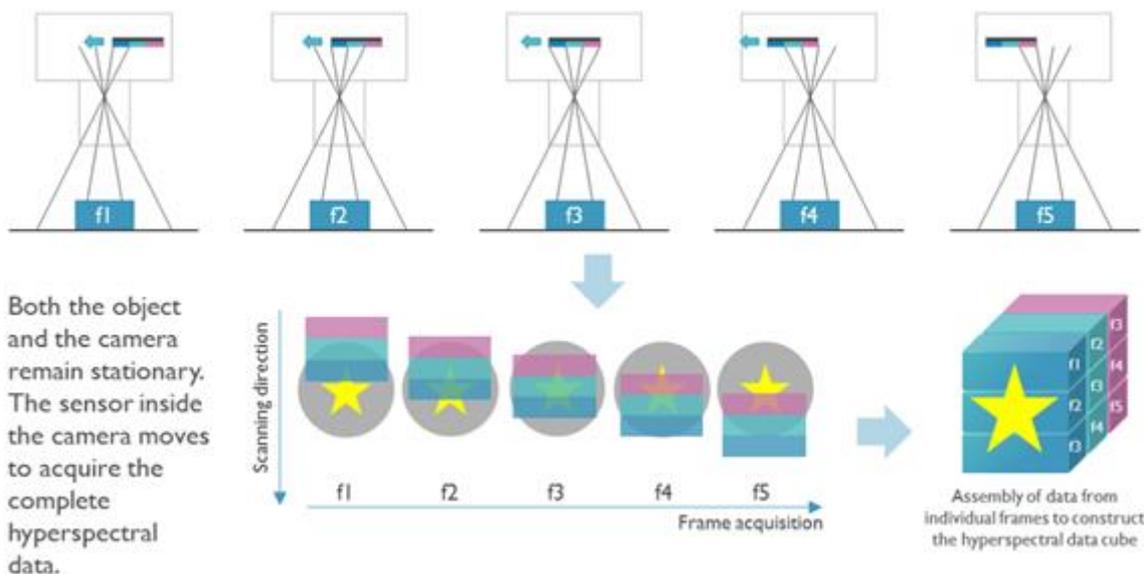
Istnieją rozwiązania hybrydowe umożliwiające skanowanie z wykorzystaniem sensora liniowego obiektów nieruchomych względem kamery.

Kamera posiada silnik przemieszczający matrycę wewnątrz obudowy. Zapewnia to możliwość skanowania nieruchomych obiektów z rozdzielczością 100 lub 150 pasm (w zależności od wybranej matrycy).

W przypadku pracy z ruchomą matrycą czas uzyskiwania zdjęcia będzie nie krótszy niż 200 ms.



Rys. 15 Budowa kamery wyposażonej w ruchomą matrycę [2]



Rys. 16 Zasada uzyskiwania obrazu hiperspektralnego nieruchomego obiektu [2]

Kamera znajduje zastosowanie w mikroskopii, obrazowaniu medycznym czyli aplikacjach gdzie wymagana jest wysoka rozdzielczość spektralna a niemożliwe jest zapewnienie wzajemnego ruchu kamery i obiektu.

W celu uzyskania obrazu konieczne jest równomierne oświetlenie całej obserwowanej sceny.

Zdecydowano o wykorzystaniu w głowicy kamer pracujących w technologii skanowania przestrzennego. Takie urządzenia pozwalają na minimalizację koniecznej do oświetlenia powierzchni próbki. Oświetlenie tylko jednego przekroju pozwala na lepsze zarządzanie strumieniem światła (polaryzacja, kształtowanie wiązki w celu uniknięcia odbłasków). Dla analizowanego przypadku, kamera skanująca w technologii skanowania przestrzennego wymaga

oświetlenia paska o szerokości 500 mm i grubości 1 mm (500 mm<sup>2</sup>) podczas gdy kamera wykorzystująca technologię skanowania przestrzenno-spektralnego wymaga oświetlenia obszaru 500 mm x 250 mm (125 000 mm<sup>2</sup>). W tym drugim przypadku wymagane jest dostarczenie 250 razy więcej energii świetlnej. Co więcej, w celu uzyskania kompletnej informacji spektralnej konieczne jest przemieszczenie obiektu na drodze 250 mm. Zastosowana kamera w technologii skanowania przestrzennego zbiera kompletne informacje o scenie wiersz po wierszu. Tylko taka kamera może zostać zastosowana w urządzeniu sortującym, gdzie odległość między rozpoczęciem skanowania produktu a rzędem dysz zdmuchujących liczona jest w dziesiątkach milimetrów i niemożliwe jest wygospodarowanie większej przestrzeni (250 mm w przypadku kamery w technologii skanowania przestrzenno-spektralnego).

### Weryfikacja w warunkach laboratoryjnych

Głównym celem badań było zebranie rzeczywistych danych hiperspektralnych oraz weryfikacja wydajności ich przetwarzania.

W ramach prac zrealizowane zostało stanowisko badawcze. Pozwala ono na przesuwanie próbek pod kamerami hiperspektralnym przy pomocy stolika liniowego napędzanego silnikiem krokowym oraz wyposażone jest w enkoder inkrementalny służący do synchronizacji pracy kamery z ruchem analizowanej próbki. Opracowano filtry do oprogramowania wizyjnego Adaptive Vision umożliwiające sterowanie przemieszczeniem stolika. Możliwe jest zarówno sterowanie pozycyjne jak i prędkościowe. Taka konstrukcja pozwala na automatyzację prowadzonych badań.

Konstrukcja mechaniczna stanowiska opiera się o zaprojektowane elementy mechaniczne oraz system profili aluminiowych Bosch Rexroth. Pozwala to na wygodne mocowanie oświetlenia oraz kamer a przez to umożliwia przeprowadzanie badań w różnych konfiguracjach toru wizyjnego.

Podczas badań zastosowano kamerę FX-10 oraz oświetlenie halogenowe pozostające w zasobach Wnioskodawcy.

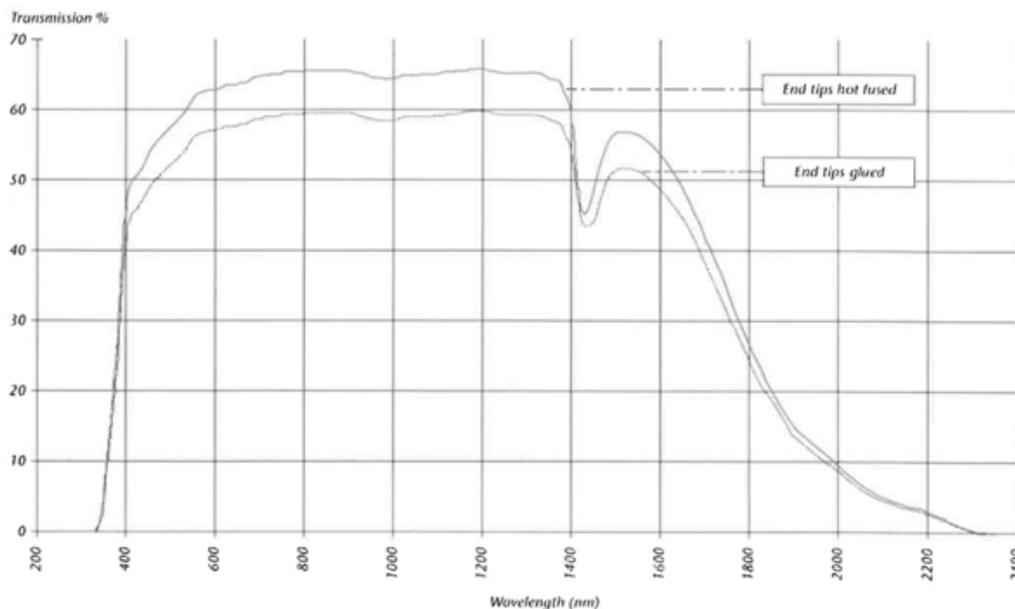


Rys. 17 Źródło halogenowe Schott Fostec wykorzystywane podczas badań. Na zdjęciu widoczny również światłowód wraz z oświetlaczem typu Backlight (źródło: [www.schott.com](http://www.schott.com))



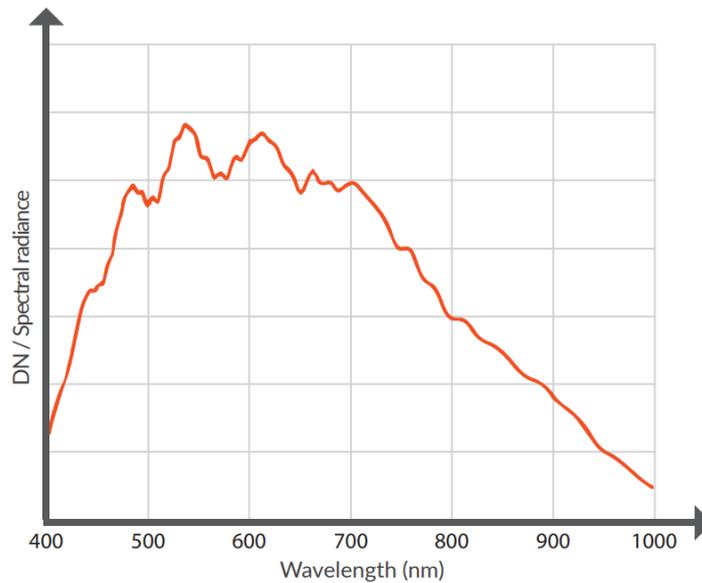
Rys. 18 Oświetlacz światłowodowy formujący linię. Jego wykorzystanie podczas badań pozwoliło na skierowanie mocy świetlnej jedynie na skanowany przekrój próbki (źródło: [www.schott.com](http://www.schott.com))

Przed zastosowaniem oświetlenia światłowodowego przeanalizowano transmisyjność zastosowanych światłowodów pod kątem możliwości zastosowania w aplikacji hiperspektralnej.



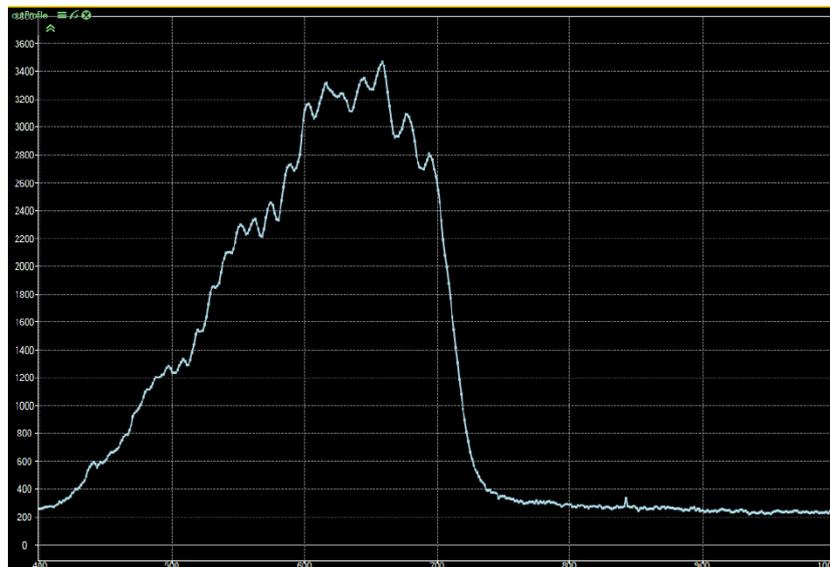
Rys. 19 Transmisja światłowodu firmy Schott (źródło: materiały handlowe firmy SCHOTT)

Stanowisko pozwala na akwizycję danych obrazowych w paśmie 400-1000 nm. W trakcie badań zidentyfikowano niedostatek intensywności oświetlenia w całym zakresie widmowym, a w szczególności w zakresie promieniowania UV. Ograniczał on możliwą do uzyskania prędkość akwizycji oraz powodował bardzo niski SNR w zakresie UV (problem był potęgowany niską efektywnością kwantową sensora kamery w zakresie promieniowania UV).

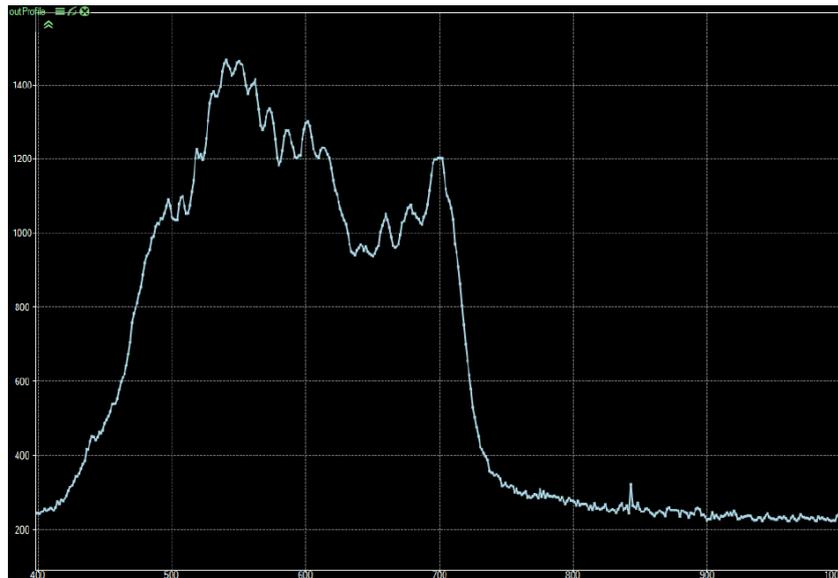


Rys. 20 Wykres efektywności sensora w funkcji długości fali kamery Specim FX10 (źródło: <https://www.specim.fi/downloads/Specim-FX10-Technical-Datasheet-01.pdf>)

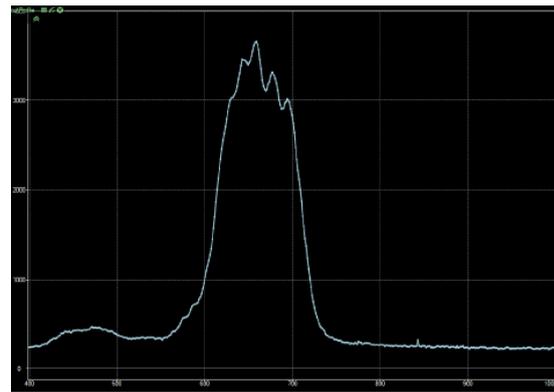
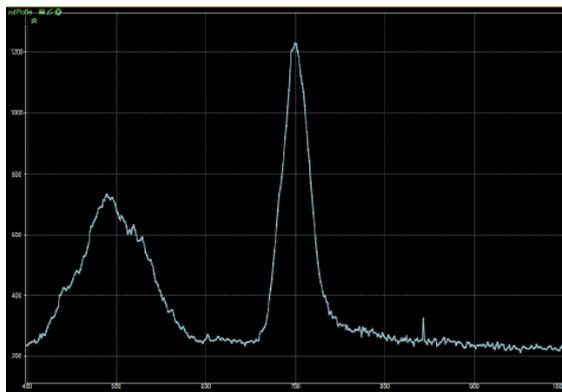
Problem został rozwiązany poprzez, suplementację źródła halogenowego skonstruowanym oświetlaczem LED pracującym w paśmie 380-400 nm. Przeprowadzono badania nad kompensacją różnic w czułości matrycy (w funkcji długości fali) oraz nierównomierności mocy oświetlenia przy pomocy filtrów pasmowo przepustowych. Potwierdzono, że ich zastosowanie kompensuje nierównomierną efektywność kwantową sensora ale nie zdecydowano się na ich stosowanie w głowicy kontrolnej.



Rys. 21 Wykres intensywności oświetlenia ze źródła Schott Fostec zarejestrowany kamerą (odbicie z referencyjnej, białej płytki referencyjnej). Widoczny spadek intensywności dla fal o długości > 700nm ma miejsce ze względu na zastosowanie w oświetlaczu filtra IR Cut. Zmniejsza on nagrzewanie się próbek oraz zabezpiecza światłowód przed uszkodzeniem



Rys. 22 Spłaszczenie wykresu intensywności po zastosowaniu wytypowanego filtra. Zastosowanie filtra poszerza zakres długości fal z akceptowalnym poziomem SNR do prowadzenia skutecznej analizy



Rys. 23 Przykładowe wykresy intensywności po zastosowaniu filtrów o niekorzystnej, z punktu widzenia aplikacji, transmisji (zbyt duże tłumienie)

O zasadności przeprowadzenia opisanych badań oraz ich prawidłowym kierunku świadczy fakt, że kilka miesięcy później, producent Specim wprowadził do swojej oferty kamerę wyposażoną w filtry pasmowe kompensujące nierównomierność efektywności kwantowej sensora. Beneficjent zdecydował o konstrukcji wielokanałowego oświetlacza LED pozwalającego na kompensację nierównomiernej czułości sensora poprzez emisję światła o różnej intensywności w funkcji długości fali. W ogólności można stwierdzić, że moc świetlna w określonej długości fali jest odwrotnością efektywności kwantowej sensora w tym zakresie.

Takie podejście charakteryzuje szereg zalet:

- W aplikacjach, w których nie występuje konieczność analizy wszystkich pasm, możliwe jest takie dobranie mocy świetlnej poszczególnych kanałów oświetlacza aby uzyskać zbliżoną do płaskiej odpowiedź rejestrowaną przez kamerę na płycie referencyjnej. Nierejestrowane pasma nie są oświetlone, co minimalizuje pobór energii, nagrzewanie próbki oraz potencjalne zjawiska fluorescencji.

- Poprzez niewykorzystywanie filtrów pasmowo-przepustowych nie następuje osłabienie czułości kamery. Pozwala to na uzyskanie krótszych czasów naświetlania w stosunku do rozwiązania z filtrami.
- Zastosowanie wielokanałowego oświetlenia LED pozwala na wygodne dostosowanie oświetlenia do poszczególnych zadań kontrolnych jedynie poprzez programową zmianęysterowania diod. Nie ma konieczności wymiany filtrów która jest kłopotliwa dla użytkownika, wymaga zakupu ich szeregu dla różnych zadań kontrolnych oraz umożliwia automatyczne (bez udziału przeszkolonego personelu) przezbrajanie głowicy.

Zidentyfikowano niedostateczną intensywność źródeł halogenowych w zakresie promieniowania SWIR (1000-1600 nm) prowadzącą do ograniczenia maksymalnej prędkości akwizycji. Mimo tego ograniczenia możliwa była akwizycja w warunkach laboratoryjnych.

W celu weryfikacji poprawności akwizycji danych przeprowadzono skanowanie nadruków referencyjnych zmierzonych kontrolnie przy pomocy spektrodensytometru.

Podczas pomiarów zidentyfikowano problem dotyczący zjawiska luminescencji niektórych podłoży w wyniku ekspozycji na promieniowanie UV. Opracowano kompensację zjawiska poprzez opracowanie kalibracji układu pomiarowego bazującego na trzech pomiarach będących referencją (zamiast standardowej kalibracji w jasnym i ciemnym polu).

W wyniku prac powstała baza danych hiperspektralnych różnych materiałów syntetycznych, obejmujących m.in. PET, LDPE, HDPE, SAN, PBT, PS, PA, PP. Dla każdej zidentyfikowanej próbki danego materiału (tj. dla danego typu materiału istnieje szereg próbek) dokonano akwizycji danych hiperspektralnych. Baza tak zebranych danych posłużyła jako dane wejściowe algorytmów klasyfikacji.

Nr. próbki	Wymiary	Grubość	Kolor
10	2-6mm	2mm	czarne
11	0-20mm	0-10mm	białe
12	3-20mm	2mm	białe
13	3mm	2mm	białe



(a)



(b)

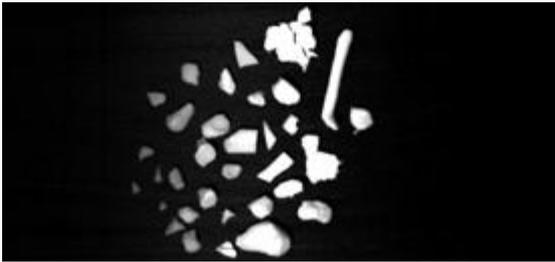


(c)

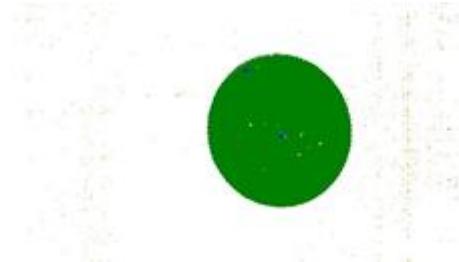


(d)

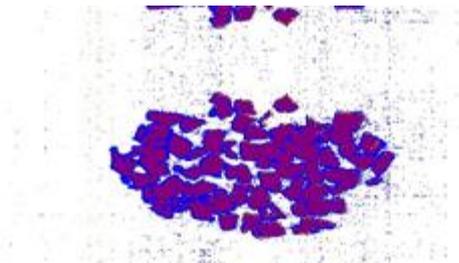
Rys. 24 Przykładowy fragment próbek materiału Polipropylenu (PP)



Rys. 25 Klasyfikacja materiału SAN. Kolejno: wizualizacja jednego z kanałów oraz wynik klasyfikacji



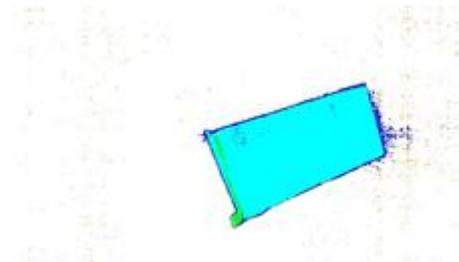
Rys. 26 Klasyfikacja materiału HDPE. Kolejno: wizualizacja jednego z kanałów oraz wynik klasyfikacji



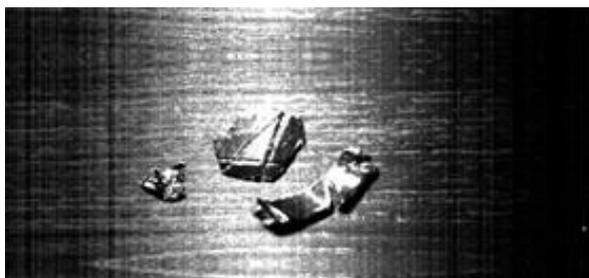
Rys. 27 Klasyfikacja materiału PBT. Kolejno: wizualizacja jednego z kanałów oraz wynik klasyfikacji



Rys. 28 Klasyfikacja materiału LDPE. Kolejno: wizualizacja jednego z kanałów oraz wynik klasyfikacji



Rys. 29 Klasyfikacja materiału PS. Kolejno: wizualizacja jednego z kanałów oraz wynik klasyfikacji



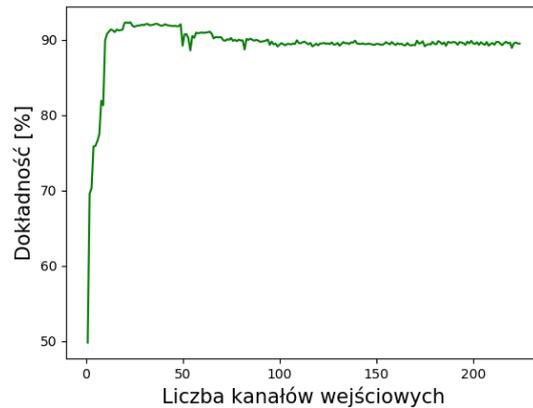
Rys. 30 Klasyfikacja czarnych materiałów HDPE i PP. Kolejno: wizualizacja jednego z kanałów oraz wynik klasyfikacji

Testy dotyczyły również wyników klasyfikacji syntetycznych materiałów. Dla zebranych danych określono typowe parametry dotyczące wyników tej operacji.

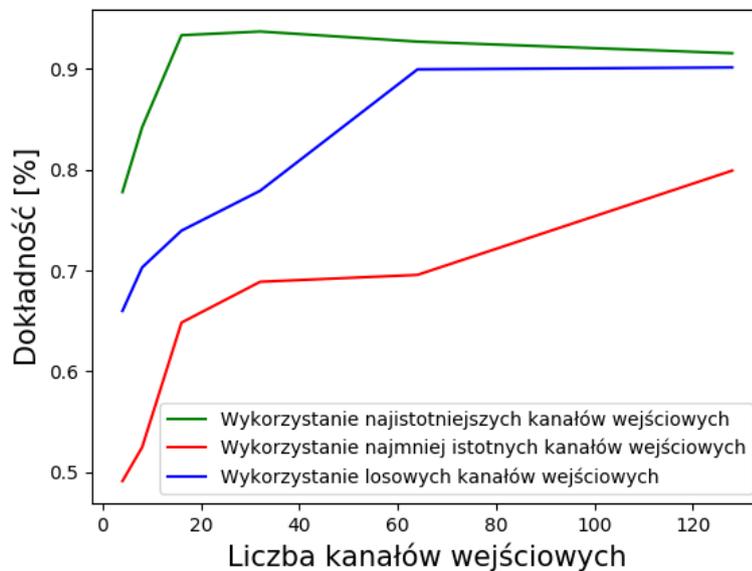
Tabela 4 Przykładowe zestawienie parametrów dotyczących dokładności klasyfikacji tworzyw sztucznych

Material	Precision	Recall	F1 score
Tło	0,9998	0,7384	0,8495
HDPE	0,9118	0,7944	0,8491
PP	0,9998	0,7384	0,8495
PS	0,9862	0,7875	0,8757
PA	0,9604	0,7997	0,8727
PBT	0,9998	0,7793	0,8759
SAN	0,9849	0,7581	0,8567
PET	0,9461	0,8124	0,8742
PAPER	0,9631	0,7972	0,8724
TETRAPA	0,9931	0,7794	0,8760
PVC	0,9423	0,7601	0,8415

W toku prac badano zakres kanałów (bandów) uzyskiwanych z kamery i ich wpływ na wyniki klasyfikacji. Dobór kanałów dobierano losowo lub szeregowano je względem istotności. Wybierano  $N$  kanałów i sprawdzano wskaźniki wyników klasyfikacji, takie jak dokładność.



Rys. 31 Wpływ liczby kanałów wejściowych na klasyfikację przykładowego klasyfikatora LGBM z wykorzystaniem normalizacji względem wartości średniej



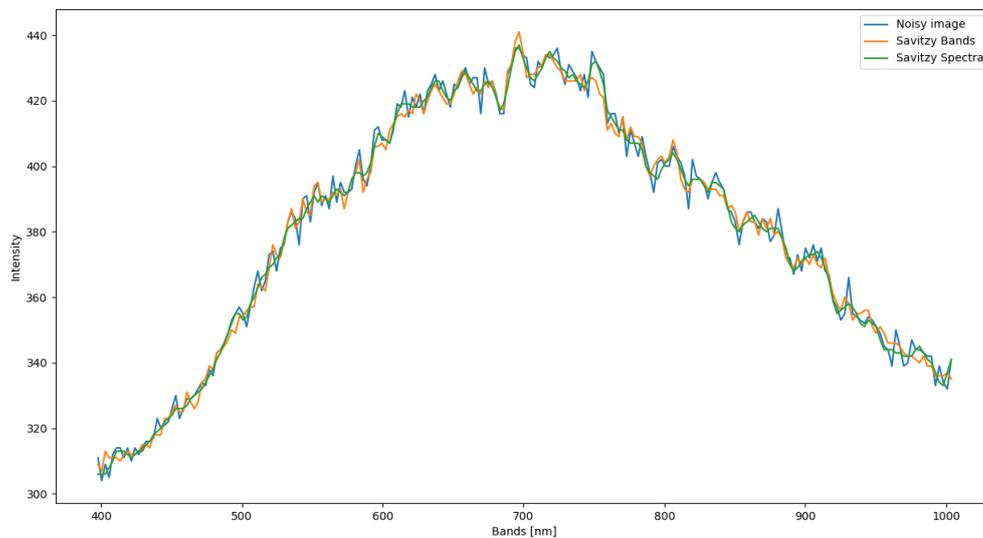
Rys. 32 Dokładności osiągnięte przez klasyfikator LGBM w zależności od kanałów wejściowych

Podczas badań zidentyfikowano problem uniemożliwiający klasyfikację niektórych polimerów w kolorze czarnym. Czarny barwnik na bazie sadzy, ze względu na bardzo wysokie pochłanianie promieniowania z zakresu SWIR, uniemożliwia uzyskanie wystarczającego poziomu SNR umożliwiającego klasyfikację. Zakłada się, że rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie promieniowania z zakresu MWIR dla którego występująca absorpcja przez sadzę jest niewielka.

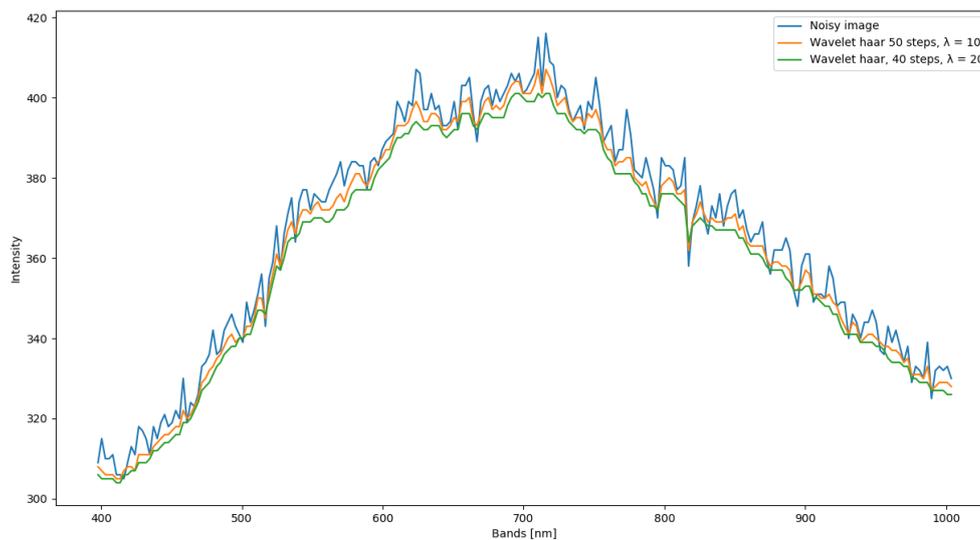
Na tym etapie dokonano analizy dostępnych bibliotek zawierających implementacje algorytmów odszumiania danych hiperspektralnych. Przeanalizowano bibliotekę napisaną w języku Python o nazwie PySptools. Zawiera ona trzy implementacje mechanizmów odszumiania dla zdjęć hiperspektralnych:

1. **Whiten** – Metoda polegająca na znalezieniu macierzy kowariancji danych w celu zdekorowania szumu i przeskalowania go. Procedura ta nosi nazwę wybielenia szumu. W przypadku analizowanych danych jest ona wyjątkowo nieskuteczna.

2. **Minimum Noise Fraction (MNF)** – W tej metodzie stosuje się w pierwszym kroku wybielenie szumu, a następnie obrót przy pomocy PCA. Efektem tego jest strata niektórych pasm. Jest to kolejna metoda, która daje niezadowalające wyniki w przypadku analizowanych danych.
3. **Savitzky-Golay** – Stosuje standardowy filtr Savitzkiego-Golaya, osobno na konkretnym paśmie i na całym spektrum. Filtr ten wygładza dane poprzez dopasowywanie do sąsiadujących ze sobą punktów wielomianów niskiego rzędu. Wyniki są zadowalające. Widać, że występuje odszumienie danych szczególnie na skrajach spektrum.



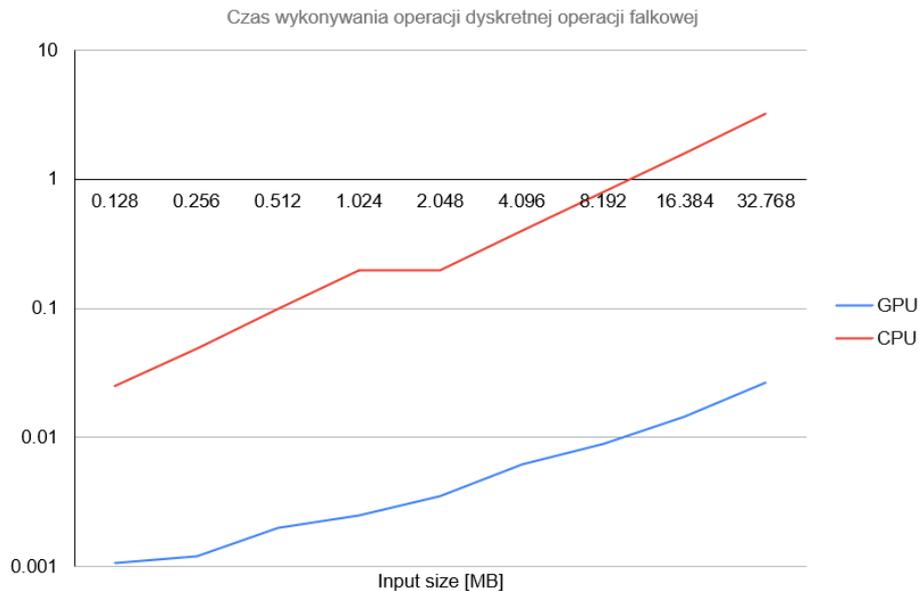
Rys. 33 Wykres przekroju spektralnego przez wybrany piksel dla przypadku zaszumionego i po użyciu filtru Savitzky-Golay dla części przestrzennej (pomarańczowy) i spektralnej (zielony)



Rys. 34 Wykres przekroju spektralnego przez wybrany piksel dla przypadku zaszumionego i algorytmu



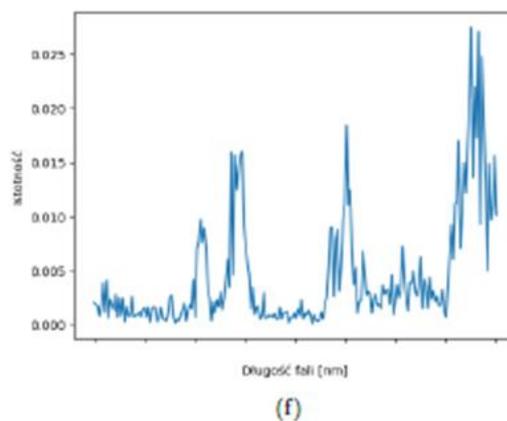
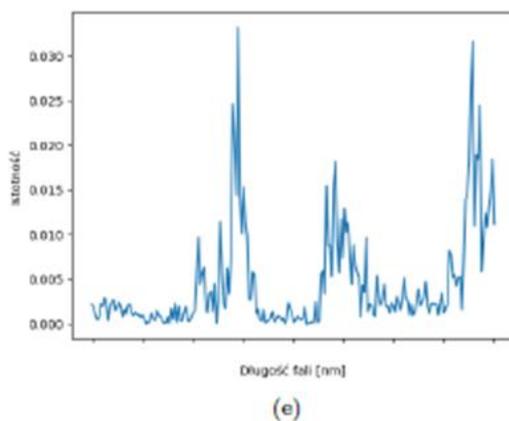
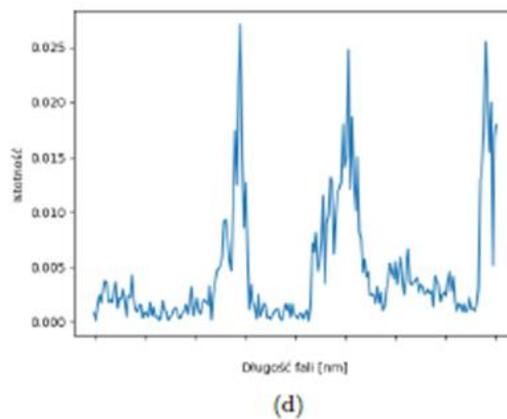
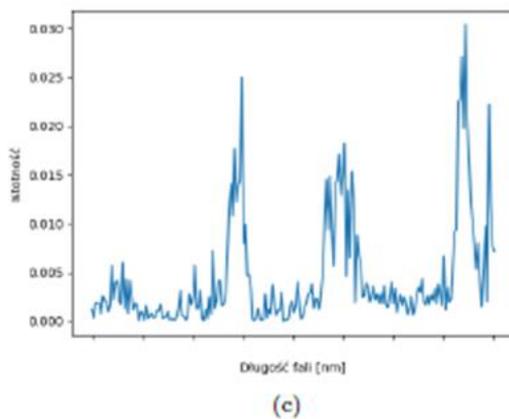
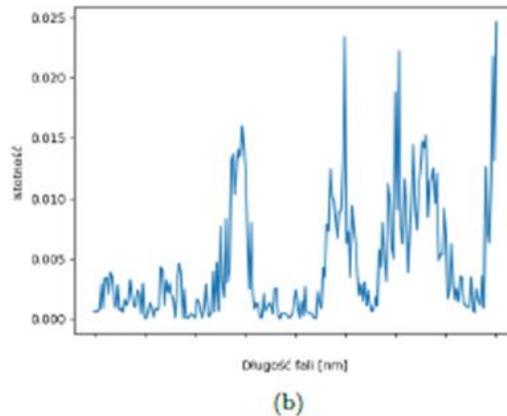
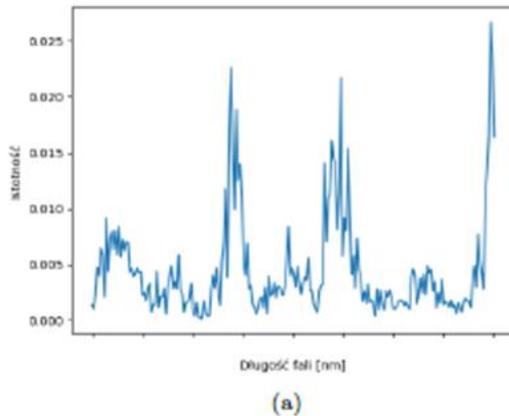
Zastosowane algorytmy uczenia maszynowego (w tym przypadku klasyfikacji) pozwoliły wykorzystać etykietowane dane do budowania zaawansowanych modeli obliczeniowych. Modele skutecznie i automatycznie dokonują analizy danych wejściowych i klasyfikują obiekty. Opcjonalna implementacja na technologii GPU (konkretniej GPGPU) pozwoliła zaoszczędzić czas obliczeniowy. Wsparcie GPU jest jednak mocno ograniczone i przeważa nad podejściem CPU + FPGA tylko w niektórych filtrach (np. transformacji falkowej).



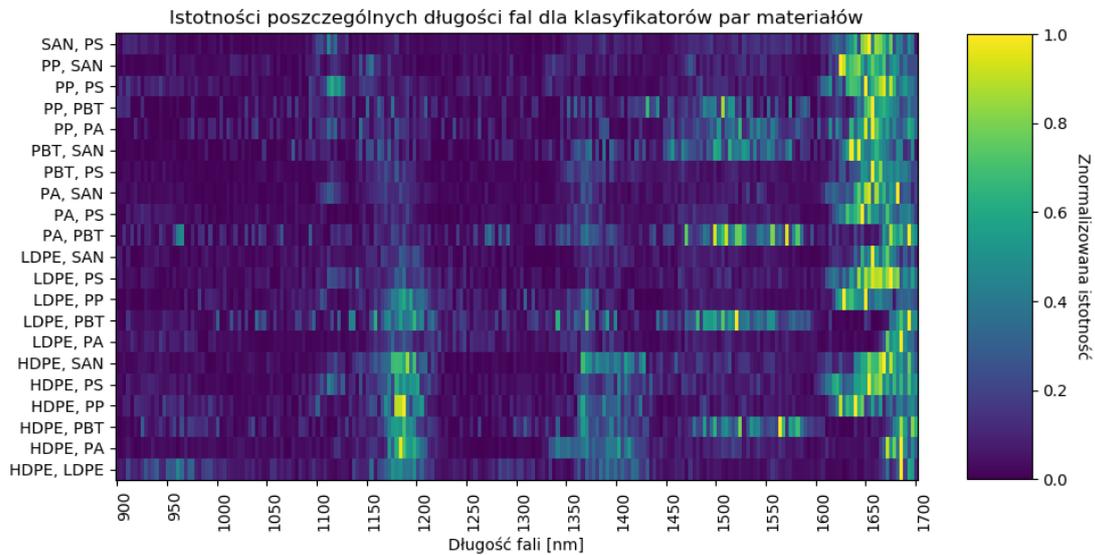
Rys. 35 Czas realizacji przykładowej operacji falkowej na danych. Czas wyrażony w sekundach

Również wykorzystanie FPGA znajdującego się na pokładzie frame grabbera pozwoliło na autorską implementację części logiki aplikacji na tym szybkim układzie, nie powodując znaczących, dodatkowych opóźnień. Jednakże należy zdawać sobie sprawę z ograniczeń związanych z lokalnością obliczeń na FPGA. W naszym przypadku, możliwa była realizacja operacji o jądrach wielkości nie większej niż 5x5. Niemożliwe jest więc mocne wygładzenie obrazu o szerokim zasięgu.

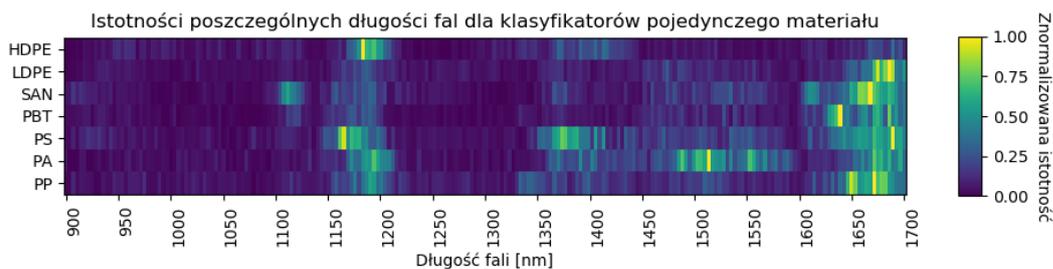
Szczegółowa analiza istotności poszczególnych pasm pozwoliła wytypować podzbiór kluczowych. Pozwala to zwiększyć liczbę klatek na sekundę uzyskiwaną z kamery przy braku zauważalnego obniżenia zdolności predykcyjnej systemu.



Rys. 36 Istotność poszczególnych długości fali oświetlenia dla par materiałów: a) HDPE i LDPE, b) HDPE i PA, c) HDPE i PBT, d) HDPE i PP, e) HDPE i PS, f) HDPE i SAN. Szczegółowe dane dostępne u Beneficjenta



Rys. 37 Wykres istotności bandów (długość fali) w kontekście przydatności atrybutu dla algorytmów klasyfikujących materiały przy odróżnianiu par materiałów



Rys. 38 Istotność poszczególnych długości fali oświetlenia dla odróżnienia danego materiału od pozostałych

Przeprowadzone prace doprowadziły do uzyskania nowej wiedzy (konkretne długości fal interesujących pod względem klasyfikacji materiałów, wyniki wydajnościowe metod na danych hiperspektralnych), i potwierdzenia koncepcji w warunkach laboratoryjnych. Pozwoliły również na określenie kierunku dalszych prac badawczych. Uzyskane informacje i wyniki zostały zebrane w postaci raportu stanowiącego wewnętrzną bazę wiedzy w firmie Wnioskodawcy.

#### Weryfikacja w warunkach zbliżonych do rzeczywistych

Przeprowadzone badania pozwoliły na zweryfikowanie opracowanych rozwiązań w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Zmodyfikowano posiadane urządzenia sortujące w celu umożliwienia montażu na nich opracowanej głowicy pomiarowej. W celu weryfikacji uzyskanych wyników wykorzystano prototypowy spektrofotometr.

W toku prac skonstruowano szerokopasmowy oświetlacz LED zapewniający oświetlenie w paśmie 370-800 nm. Jako źródło światła służą skonstruowane dwa oświetlacze liniowe z optyką skupiającą. Każdy oświetlacz składa się z części mechanicznej (radiator oraz obudowa), optycznej (soczewka skupiająca, walcowa) oraz elektrycznej (płytki PCB z diodami LED). Na potrzeby oświetlenia zaprojektowano moduły oświetleniowe AVMSL (AVICON MultiSpectral Light). Każdy z oświetlaczy zawiera jeden taki moduł. Na płytce PCB znajduje się sześć niezależnych szeregów diod LED. Dla dwóch oświetlaczy daje to możliwość wykorzystania 12 niezależnych

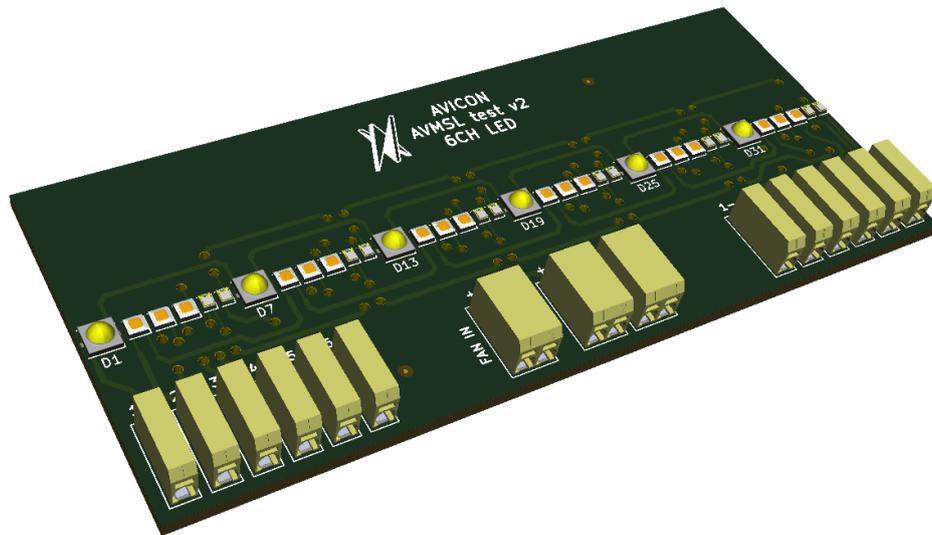
szeregów diod LED. Każdy szereg LED (kanał) zawiera ten sam model diody LED na konkretną długość fali. Stąd całe stanowisko pozwala na niezależne sterowanie 12 różnymi zakresami spektralnymi. Przeprowadzone testy pozwoliły na wytypowanie diod LED o najlepszych zakresach spektralnych dla celów kolorymetrycznych oraz określenie czy możliwe jest uzyskanie jednorodnej i ciągłej charakterystyki spektralnej opartej na źródłach światła w postaci diod LED.

Nr kanału	Spektrum	Moc świetlna	Maksymalny prąd
1	VIS, biały 4000K	114 lm / 350 mA	2000 mA (ograniczony do 1500 mA)
2	UV, 380 - 390 nm	475 mW / 500 mA	1000 mA
3	UV, 390 - 400 nm	675 mW / 500 mA	1000 mA
4	UV, 400 - 410 nm	930 mW / 500 mA	1500 mA
5	UV, 410 – 420 nm	725 mW / 500 mA	1000 mA
6	VIS, 420 – 430 nm	458 mW / 350 mA	1200 mA
7	VIS, 440 – 460 nm	425 mW / 350 mA	1000 mA
8	VIS, 420 – 430 nm	38 lm / 500 mA	1000 mA
9	VIS, 490 – 510 nm	82 lm / 350 mA	1000 mA
10	VIS, 520 – 540 nm	117 lm / 350 mA	1000 mA
11	VIS, PC Amber	78 lm / 350 mA	1000 mA
12	VIS, 720 – 750 nm	240 mW / 350 mA	1000 mA

Tabela 5 specyfikacja kanałów oświetlacza AVICON MultiSpectral Light

W stanowisku zastosowano powyższe zakresy długości fal (układ pozwala na pracę z prądami maksymalnymi do 1500 mA na kanał). Parametr spektrum nie określa dokładnego całościowego spektrum dla diody LED, lecz zakres spektralny dla którego intensywność dla danej długości fali przekracza ustalony przez producenta próg intensywności promieniowania. Rzeczywiste spektrum każdego z modelu diody LED jest szersze, jednak intensywność promieniowanego światła jest o wiele niższa niż intensywność dla szczytowej długości fali.

Długość świetlna pojedynczego oświetlacza wynosi 100 mm.



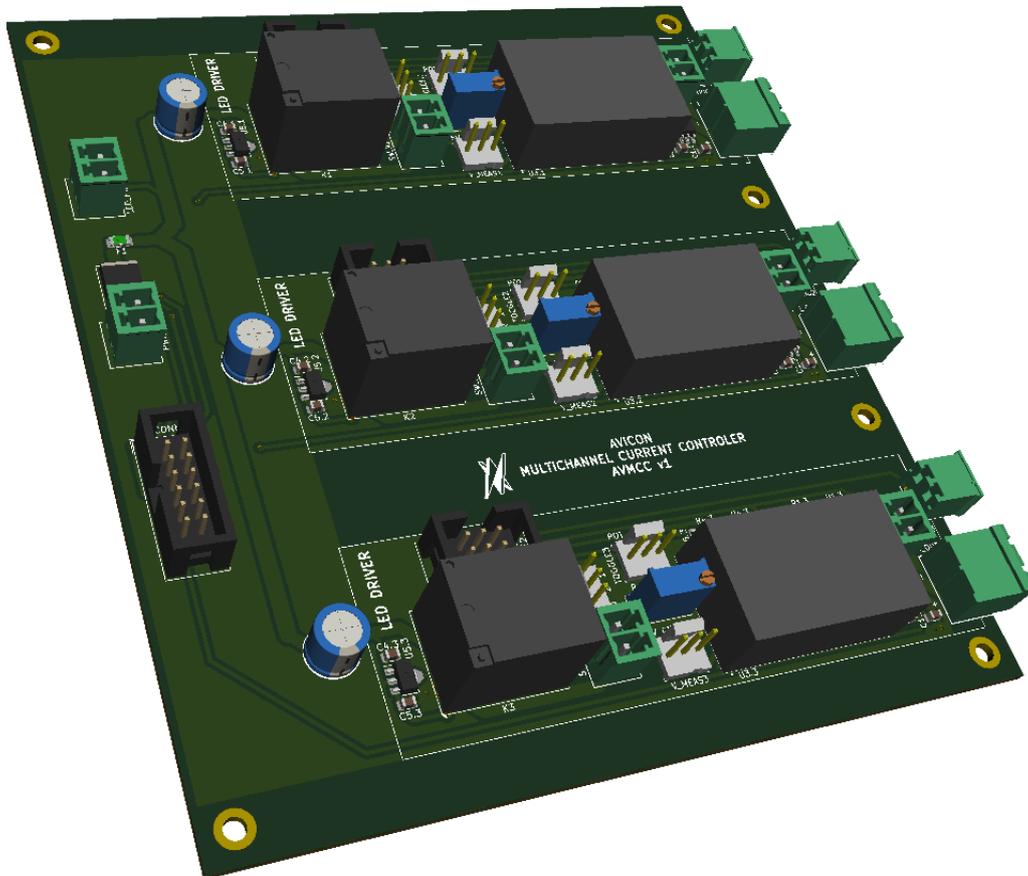
Rys. 39 Model płytki PCB oświetlacza

Zastosowano diody LED dużej mocy, co pozwoliło na uzyskanie niskich czasów naświetlania kamery. Badania wykazały, że aby w odpowiednim stopniu odprowadzić ciepło z układu konieczne jest zastosowanie dwuwarstwowej płytki PCB na podłożu aluminiowym, przyklejone do aluminiowego radiatora z aktywnym, wentylatorowym systemem chłodzenia. Badania z wykorzystaniem kamery termowizyjnej pozwoliły na precyzyjne określenie temperatury struktury diody LED w warunkach pracy.

Zaprojektowana optyka pozwala na skupienie wiązki i uzyskanie wysokiej mocy powierzchniowej w skanowanym przekroju. Wysokie skupienie wiązki pozwala na uzyskanie czasów naświetlania rzędu 1 ms.

Skonstruowano sterownik LED złożony z modułów sterujących AVMCC v1 (AVICON MultiChannel Controller v1) oraz z elementów umieszczonych na panelu sterującym pozwalających na załączanie kanałów, regulację prądu oraz wyświetlanie aktualnego prądu. Na potrzeby sterownika zaprojektowano moduły sterujące AVMCC w postaci płytek PCB. Sterownik pozwala na niezależne sterowanie prądowe 12 wyjść jednocześnie. Sterownik pracuje w trybie pracy ciągłej. Opcje i parametry każdego z kanałów są następujące:

- możliwość załączania / wyłączenia każdego z kanałów niezależnie
- regulowany prąd w zakresie: 0 – 1500 mA dla każdego z kanałów niezależnie
- maksymalne napięcie wyjściowe: 20 V
- maksymalna moc na kanał: 30 W
- pomiar prądu każdego z kanałów i wyświetlanie na wyświetlaczu panelowym



Rys. 40 Model płytki drukowanej sterownika

Skonstruowany sterownik pozwala na sterowanie poszczególnymi kanałami oświetlacza w celu kompensacji nierównomierności efektywności kwantowej sensora w funkcji długości fali. Pozwala to na uzyskanie korzystnego SNR w szerokim zakresie pomiarowym.

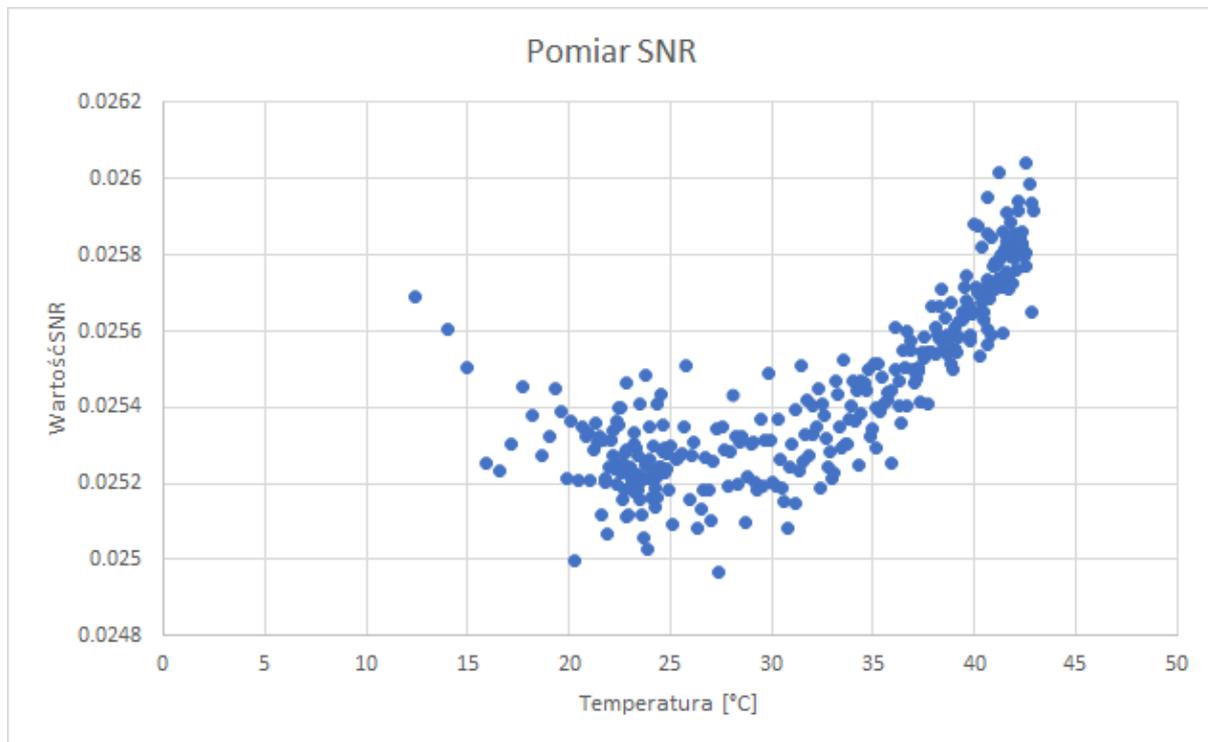
Zaprojektowano i wykonano badawczy oświetlacz LED pracujący w paśmie SWIR. Badania prowadzone z jego wykorzystaniem pozwoliły na potwierdzenie koncepcji zastosowania źródeł LED do konstrukcji oświetlacza pracującego w zakresie SWIR.

Zaprojektowano i skonstruowano głowicę pomiarową składającą się z obudowy mieszczącej dwie kamery hiperspektralne oraz zestawu oświetlaczy. Zbadano dostępne rozwiązania umożliwiające chłodzenie głowicy. Zweryfikowano ich skuteczność i przydatność do zastosowania w zależności od warunków środowiskowych, w których będzie pracować urządzenie. Przeprowadzono badanie materiałów, które mogą być zastosowane jako wzierniki głowicy, ze szczególnym uwzględnieniem ich właściwości transmisyjnych w zakresie SWIR oraz możliwości zastosowania w poszczególnych gałęziach przemysłu i aplikacjach kontrolnych.

Zbadano wpływ nagrzewania kamery na szum termiczny kamery. W tym celu zmierzono parametr SNR zdefiniowanego jako stosunek odchylenia standardowego szumu do średniej mocy sygnału przy zamkniętej przesłonie dla stopniowo nagrzewającej się kamery. Wykres wartości parametru SNR w zależności od temperatury układów scalonych przedstawiono na Rys. 41. Można zaobserwować zmiany wartości



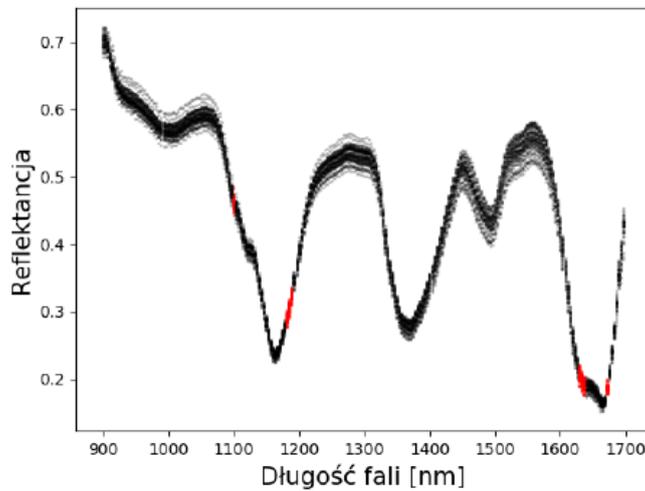
parametru wraz ze wzrostem temperatury, jednak zmiany te są marginalne. Dla każdej zmierzonej temperatury mieści się on w zakresie określonym w dokumentacji technicznej.



Rys. 41 Pomiar zmian wartości parametru SNR w zależności od temperatury

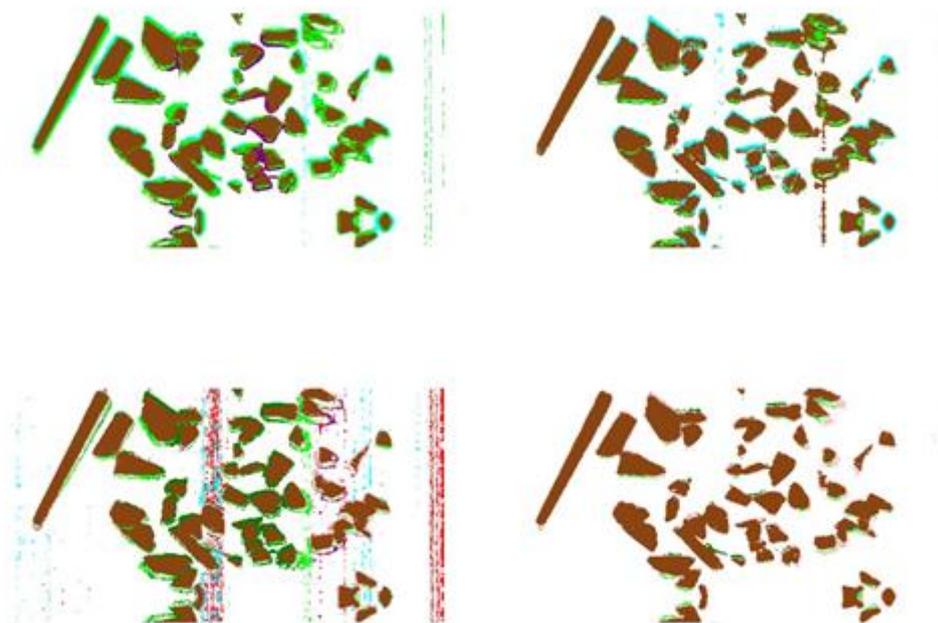
Akwizycja na urządzeniach sortujących pozwoliła na pracę z prędkościami większymi niż możliwymi do uzyskania w warunkach laboratoryjnych. Potwierdzono możliwość akwizycji obrazów z prędkością 3 m/s (przy rozdzielczości przestrzennej 1 px / 3 mm). Zweryfikowano skuteczność klasyfikacji po ograniczeniu liczby zbieranych (i analizowanych) pasm. Efektywnie, możliwa jest praca urządzenia w reżimie czasu rzeczywistego, tj. nadążającego z prędkością obliczeń w związku z napływającymi danymi wejściowymi.

Jednym z problemów było wyznaczenie najważniejszych kanałów (bandów) kamery, które było obciążone dużą stopą błędów oraz czasochłonnością. Aby wyznaczyć je w sposób zautomatyzowany skorzystaliśmy z mocy obliczeniowych komputera i wykorzystaliśmy metody uczenia maszynowego do określenia istotnych bandów. Z wyników z przeprowadzonego szeregu eksperymentów wybraliśmy informacje uzyskane z użyciem metody LGBM. Wybór kanałów za pomocą tej metody nie był obciążony błędem, a pozwalał na selekcję zgrupowanych bandów.

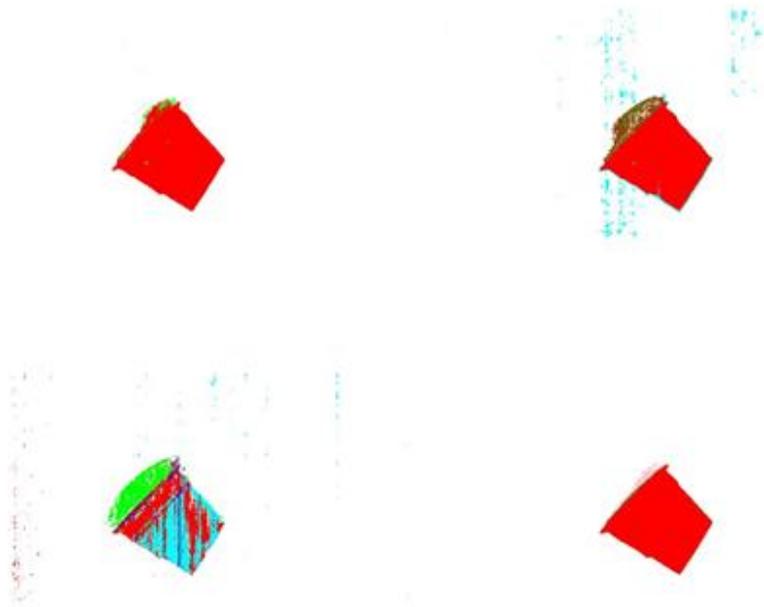


Rys. 42 Przykładowy wykres refleksyjności materiału z zaznaczonymi zakresami najbardziej istotnych bandów dla zadania klasyfikacji

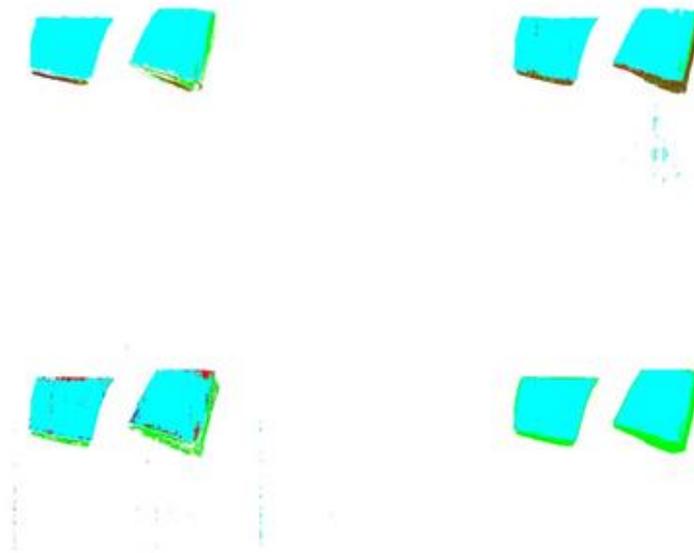
Przeprowadzone testy na urządzeniu sortującym potwierdziły skuteczność algorytmów uczenia maszynowego – klasyfikacji na poziomie dla nieprzezroczystych materiałów na poziomie 92,8% - 99,9% (rozdzielane materiały HDPE, PA, Papier, PBT, PP, PVC, SAN, Tetrapak). W przypadku przezroczystych materiałów PET oraz PS osiągnięto odpowiednio wyniki 80.4% oraz 74.7%.



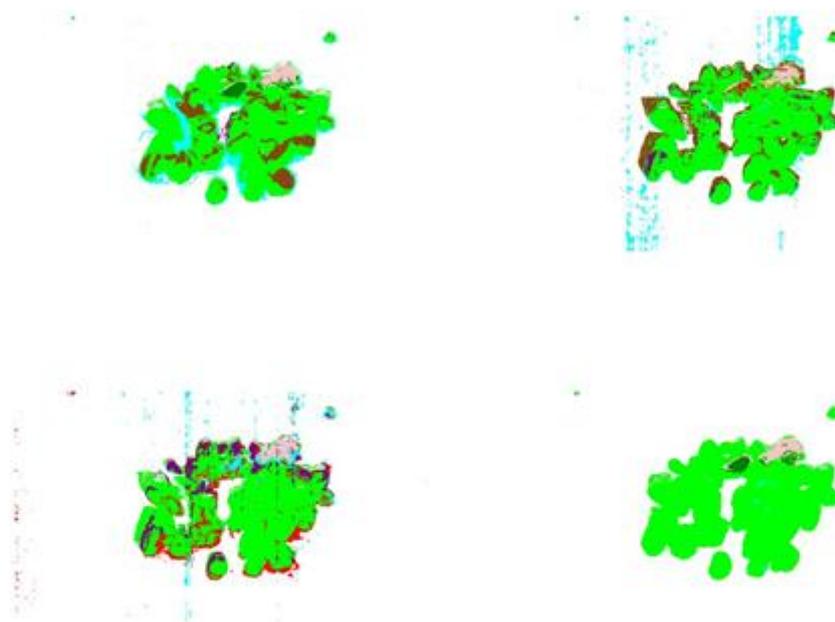
Rys. 43 Wyniki klasyfikacji PA z wykorzystaniem klasyfikatorów uczonych zakresem spektrum kolejno: 1150-1200 nm, 1360-1420 nm, 1480-1580 nm, 1600-1700 nm. Kolor brązowy oznacza właściwie sklasyfikowany materiał



Rys. 44 Wyniki klasyfikacji PP z wykorzystaniem klasyfikatorów uczonych zakresem spektrum kolejno: 1150-1200 nm, 1360-1420 nm, 1480-1580 nm, 1600-1700 nm. Kolor czerwony oznacza właściwie sklasyfikowany materiał



Rys. 45 Wyniki klasyfikacji PS z wykorzystaniem klasyfikatorów uczonych zakresem spektrum kolejno: 1150-1200 nm, 1360-1420 nm, 1480-1580 nm, 1600-1700 nm. Kolor turkusowy oznacza właściwie sklasyfikowany materiał



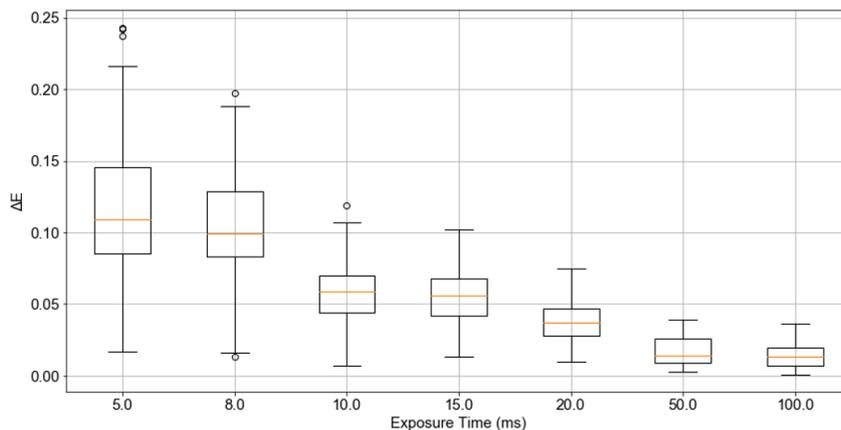
Rys. 46 Wyniki klasyfikacji SAN z wykorzystaniem klasyfikatorów uczonych zakresem spektrum kolejno: 1150-1200 nm, 1360-1420 nm, 1480-1580 nm, 1600-1700 nm. Kolor jasnozielony oznacza właściwie sklasyfikowany materiał

Podstawowa proponowana metoda opiera swoje działanie o miarę współzależności realizowanej poprzez miarę korelacji Pearsona. Nie jest to jedyna miara współzależności. Co więcej, nie wychwytuje nietypowych zależności. Dla celów poprawy uzyskiwanych wyników proponowanej metody, przeanalizowano inne operatory, w tym metody kategorii MIC (*maximal information coefficient*) oraz MINE (*maximal information-based nonparametric exploration*). Metody te służą do znalezienia istotnych związków w dużych zestawach danych. Jednakże, pomimo dużych oczekiwań, nie odnotowano pozytywnego wpływu na wyniki klasyfikacji, a jedynie zaobserwowano olbrzymi wzrost czasu potrzebnego do wykonywania algorytmu. Przykładowo, w przypadku rozmiaru problemu 10000 próbek (każda 4x32 atrybuty) czas wykonywania typowego operatora MINE wynosił ponad sekundę, co jest około trzy rzędy wielkości większą wartością od wyznaczenia korelacji Pearsona.



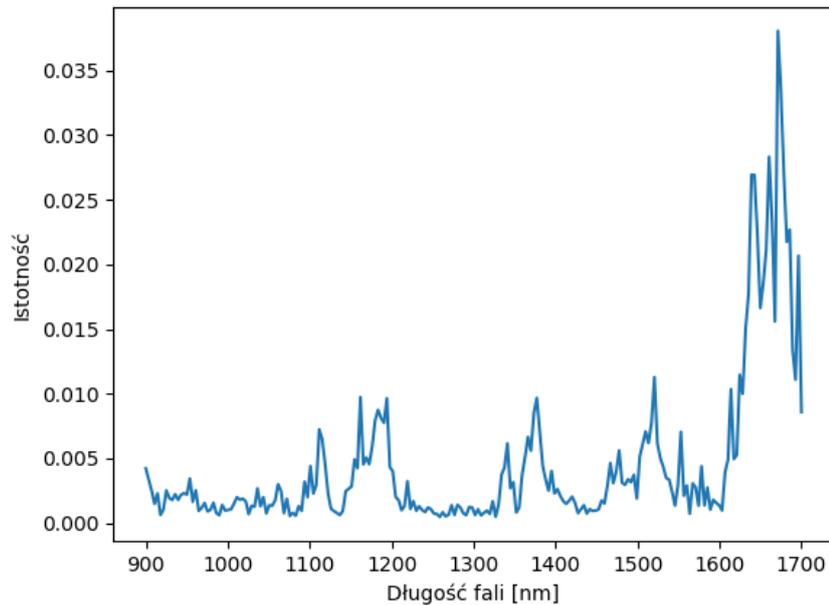
Rys. 47 W kontekście klasyfikatorów, zrealizowano wybrane w środowisku Adaptive Vision Studio, stanowiącym istotny punkt rozwiązania. Implementację zrealizowano albo za pomocą generycznego kodu AVS albo za pomocą bibliotek C++ w postaci dynamicznych bibliotek DLL

W ramach testów, w celu określenia wpływu czasu ekspozycji kamery na wyniki, zrealizowano test w oparciu o parametr delta E. Dotyczy on danych dotyczących pomiaru koloru, ale w naszym przypadku jest dobrym agregatem danych hiperspektralnych. Dla wybranego szeregu zdefiniowanych czasów ekspozycji zrealizowano wielokrotne pomiary tego samego materiału i wyznaczono rozbieżności parametru delta E w ramach danego zbioru.



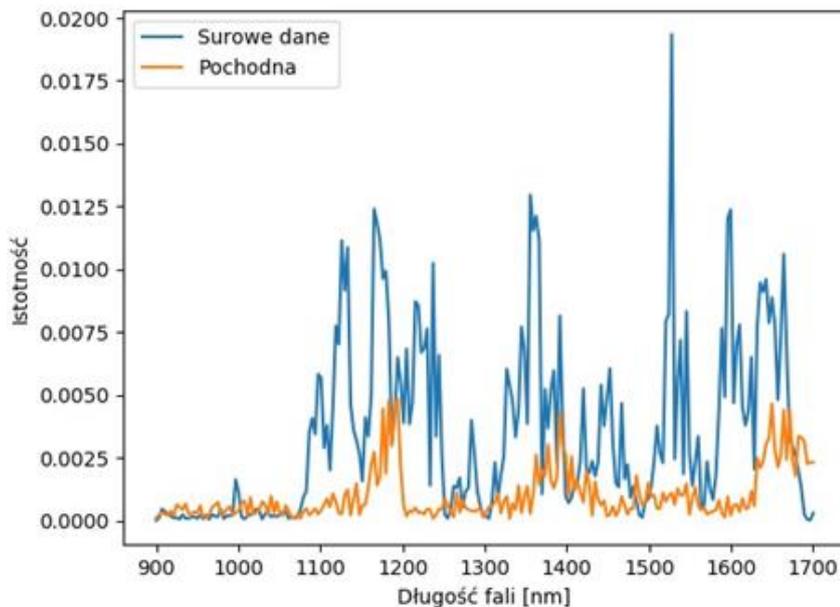
Rys. 48 Zależność parametru deltaE mierzony w czasie w funkcji czasu ekspozycji kamery

W ramach badań kontynuowano w nowych warunkach analizę istotności bandów. Ponieważ proponowana metoda nie ma wbudowanej miary istotności atrybutów, posłużono się klasyfikatorem lasu losowego, który miary istotności generuje w sposób naturalny.



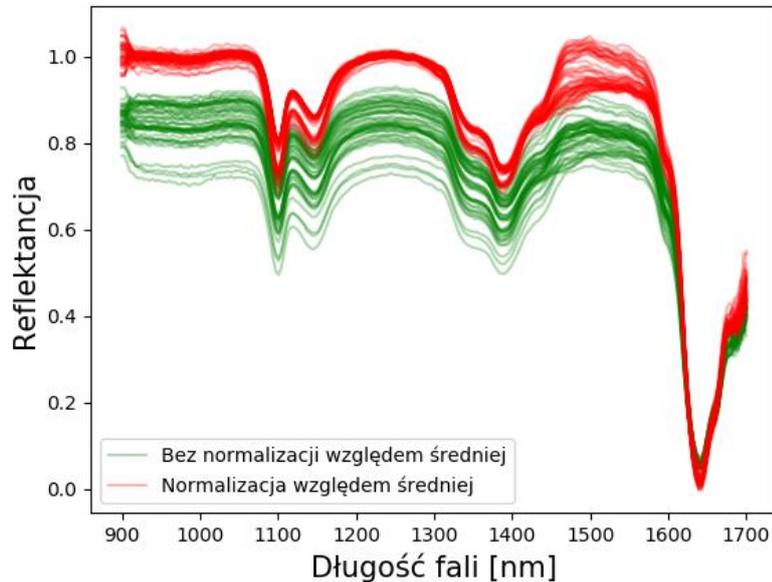
Rys. 49 Przykładowy wykres istotności poszczególnych bandów (długość fali) dla klasyfikatora lasu losowego

Podstawowymi danymi do uczenia klasyfikatorów są wartości intensywności dla poszczególnych długości fal. Jednakże czasem warto wspomóc proces uczenia podaniem wartości pochodnych intensywności. Takie dane, będące dodatkowymi danymi wejściowymi do uczenia maszynowego, pozwalają (potencjalnie) na skrócenie czasu trenowania kosztem konieczności obliczenia i przekazania pochodnej. W przypadku naszych testów okazało się, że taki zabieg nie wpływa zasadniczo na wyniki klasyfikatorów. Okazuje się, że surowe dane są znacząco istotniejsze.



Rys. 50 Istotność poszczególnych długości fali oświetlenia dla klasyfikatora uczonego surowymi danymi i pochodną tych danych umieszczone na jednym wykresie

Ze względu na fakt, że przebiegi refleksyjności materiałów są czasem przesunięte względem siebie, zbadano wpływ wykorzystania normalizacji względem wartości średniej przebiegu. Efekt normalizacji zobrazowano na rys. 51.



Rys. 51 Wpływ zastosowania normalizacji względem wartości średniej

Przetestowano działanie klasyfikatora dla innych zadań kontrolnych np. wykrywanie kleju. Przeprowadzone prace doprowadziły do uzyskania nowej wiedzy i potwierdzenia koncepcji w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Pozwoliły również na określenie kierunku dalszych prac badawczych. Uzyskane informacje i wyniki zostały zebrane w postaci raportu stanowiącego wewnętrzną bazę wiedzy w firmie Wnioskodawcy.

### Realizacja prototypu

Ostatni etap prac skupiony był na opracowaniu systemu informatycznego łączącego zdobytą wiedzę oraz zapewniającego komunikację z układami akwizycji oraz wykonawczymi. W trakcie prac zebrano obszerną bibliotekę widm materiałów opakowaniowych. Pozwoliła ona na dalsze prace nad algorytmami klasyfikacji.

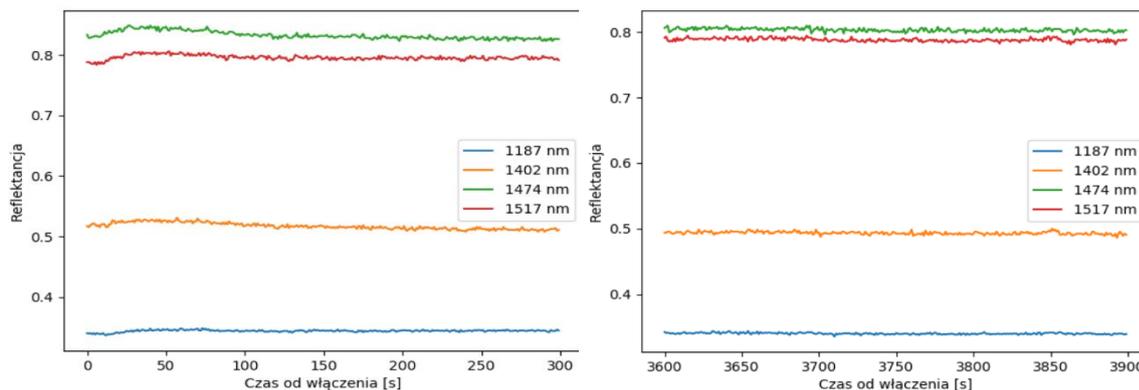
Aplikacja kontrolna została rozbudowana o moduły obsługi sprzętu wspierające m.in. komunikację po protokole Modbus TCP oraz EtherCAT. Na bazie interfejsu EtherCAT opracowano własny algorytm transmisji danych zapewniający dużą przepustowość oraz wygodną implementację po stronie sterownika PLC. EtherCAT jest nowoczesnym protokołem komunikacyjnym umożliwiającym wymianę danych między komponentami systemu w czasie rzeczywistym. Interfejs EtherCAT wykorzystuje medium komunikacyjne w postaci skrętki ethernetowej, lecz w odróżnieniu od innych protokołów zamiast korzystać z transmisji pakietowej, wykorzystuje mechanizm oparty o telegramy. Dzięki takiemu rozwiązaniu dane wymieniane są między urządzeniami „w locie”. Przykładowy czas obsługi 1000 wejść/wyjść cyfrowych zajmuje jedynie 30  $\mu$ s. Interfejs EtherCAT został wykorzystany do komunikacji między sterownikiem PLC a komputerem PC ze względu na bardzo małe czasy opóźnień w przesyłaniu danych.

Do realizacji komunikacji po EtherCAT, celem zapewnienia minimalnego czasu opóźnień, wykorzystano mechanizmy pamięci współdzielonej, inteligentnych wskaźników oraz potoki. Komunikacja opiera się o autorski interfejs przekazywania tablicy wartości związanych z regionami oraz stanami dysz dla wspomnianych regionów.

Algorytm obsługi zaworów pneumatycznych do odrzucania (zdmuchu) frakcji, uznanej przez algorytmy wizyjne jako wadliwa na podstawie sygnału binarnego wystawianego przez frame grabber, generuje unikalny w określonym przedziale czasu numer ramki, który wysyłany jest do komputera PC za pomocą interfejsu EtherCAT. Równolegle sterownik PLC oczekuje na zestaw danych niezbędnych do obsługi zaworów. Są to dane parametryczne dobierane przez operatora na podstawie właściwości mechanicznych sortowanego surowca: czas opóźnienia otwarcia zaworów, czas otwarcia zaworów oraz dane wynikające z analizy zebranych obrazów: unikalny numer ramki nadany przez PLC.

Zaletą zastosowania interfejsu EtherCAT do komunikacji między komputerem PC a sterownikiem PLC jest szybkość wymiany danych oraz łatwość w zmianie ilości obsługiwanych zaworów. Komputer ze sterownikiem PLC łączy się za pomocą standardowego przewodu ethernetowego, a w jednej sieci może współpracować więcej niż jeden komputer.

Jednym z problemów okazała się stabilizacja danych otrzymywanych z kamery. Jak widać na rys. 52, występuje zarówno krótkofalowa zmienność (w skali dziesiątek sekund) wartości refleksyjności jak i długofalowa zmienność (w skali tysięcy sekund). Ta pierwsza jest związana głównie z pierwszym uruchomieniem stanowiska i nagrzewaniem się poszczególnych elementów aparatury po rozpoczęciu pracy. Informacja ta jest istotna celem wyznaczenia bezpiecznego momentu, w którym możliwa np. jest kalibracja bieli. Z kolei dłuższa perspektywa zmienności jest brana pod uwagę w kontekście konieczności ponownej kalibracji w trakcie eksploatacji systemu.



Rys. 52 Wykres refleksyjności (w wybranych pasmach pomiarowych) przykładowego materiału w funkcji czasu od włączenia aparatury pomiarowej

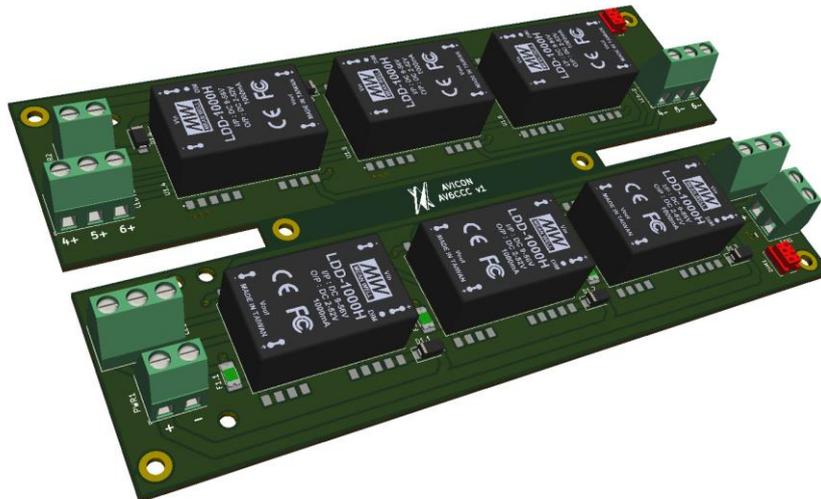
Głowicę testowano z promiennikiem IR jako źródłem promieniowania SWIR. Zaprojektowano, wykonano i przetestowano szerokopasmowy oświetlacz SWIR oparty o diody LED. Przeprowadzone wcześniej badania wykazały, że korzystne jest wysokie skupienie oświetlenia w przekroju pomiarowym ze względu na niską efektywność sensorów w zakresie pasma SWIR. Zdecydowano na konstrukcję oświetlacza wyposażonego w optykę skupiającą której projekt uwzględnił badanie skuteczności pracy w zakresie podczerwieni. Oświetlacz posiada zintegrowaną część oświetleniową oraz zasilająco-sterującą. Oświetlacz posiada 6 niezależnych kanałów, które odpowiadają różnym długościom fali. Parametry zaprojektowanego oświetlacza:

- długość świetlna: 500 mm,
- dwa typy optyki: walcowa na bliski dystans oraz skolimowana na daleki dystans,
- zakres spektralny: 1000 – 1700 nm,
- zasilanie: 24 V,

- maksymalna moc elektryczna: 162 W,
- ilość kanałów: 6,
- możliwość załączania / wyłączenia każdego z kanałów niezależnie,
- możliwość regulacji intensywności światła sygnałem analogowym 0 – 10 V każdego z kanałów niezależnie,
- chłodzenie aktywne wentylatorowe.

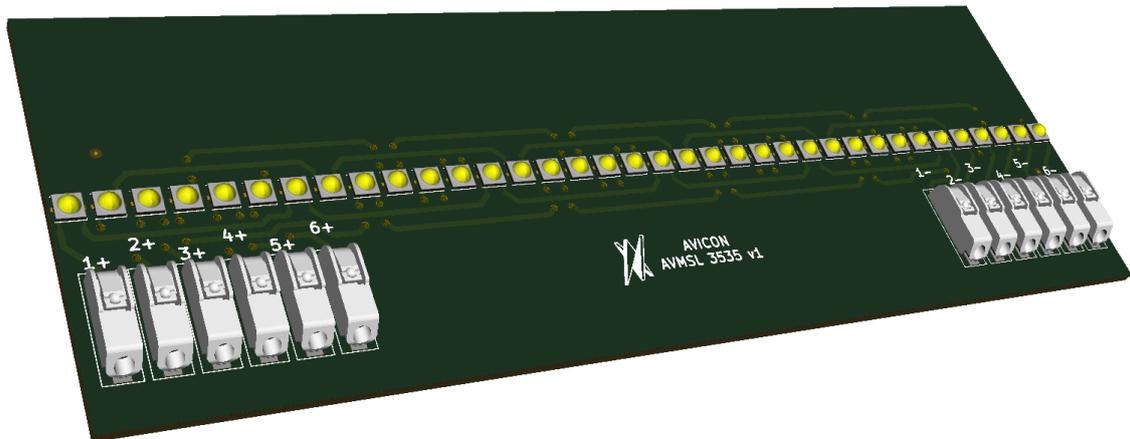
Oświetlacz posiada zintegrowany układ zasilania każdego z szeregów diod LED w sposób niezależny. Na potrzeby urządzenia zaprojektowano moduły zasilające AV6CCC (AVICON 6 Channel Current Controller).

- napięcie zasilania: 24 V,
- maksymalne napięcie wyjściowe: 20 V,
- maksymalny prąd wyjściowy: 1000 mA,
- maksymalna moc na kanał: 20 W,
- możliwość załączania / wyłączenia każdego z kanałów niezależnie,
- regulowany prąd w zakresie 0 – 1000 mA sygnałem analogowym 0 – 10 V każdego z kanałów niezależnie.



Rys. 53 Model układu regulacji prądu AV6CCC

Jako źródło światła zastosowano specjalistyczne diody LED wlutowane na zaprojektowany moduł oświetleniowy AVMSL 3535 (AVICON MultiSpectral Light 3535). Płytkę PCB zawiera 6 niezależnych szeregów diod LED. Płytkę wykonano w technologii dwuwarstwowej na aluminiowym podłożu co pozwala na efektywne odprowadzanie ciepła z modułu PCB do aluminiowego radiatora. Zastosowane diody LED pozwalają na prowadzenie testów dla zakresu spektralnego 1000 – 1700 nm. Wykorzystywane diody LED wykonane zostały w nowo wprowadzonej technologii produkcji chipów LED dla zakresu SWIR (tzw. D-Type chip), która pozwala na uzyskanie kilkukrotnie większych wartości energii promieniowanej względem starszych konstrukcji.

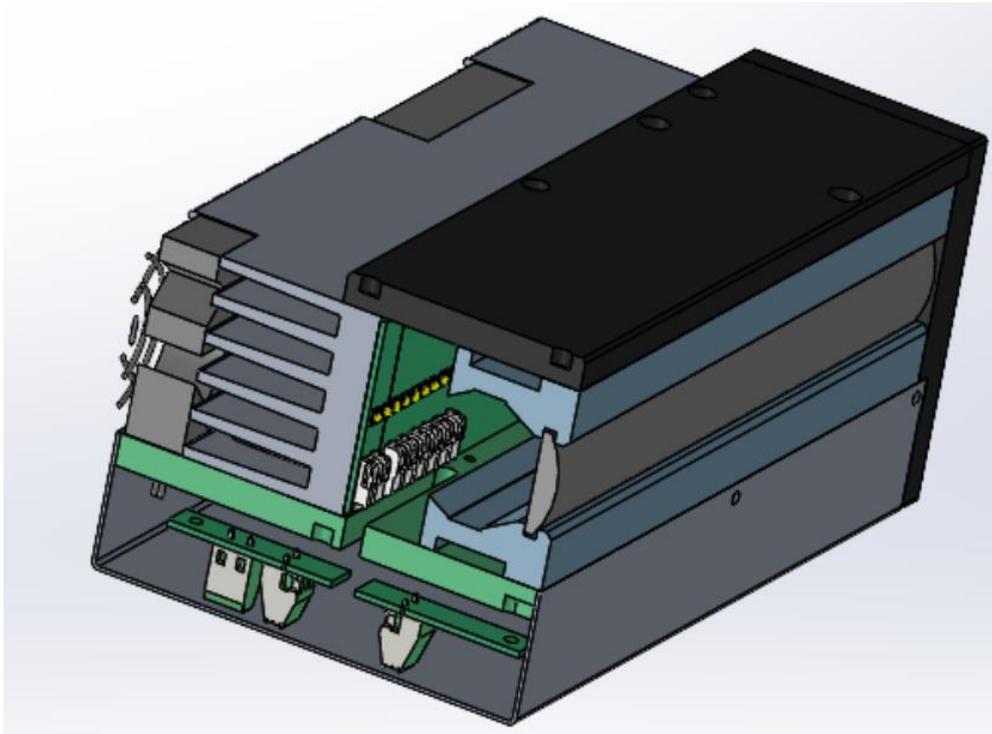


Rys. 54 Model pojedynczego modułu AVMSL 3535

W poniższej tabeli przedstawiono zastosowane modele diod LED. Parametr spektrum nie określa dokładnego całościowego spektrum dla diody LED, lecz zakres spektralny, dla którego intensywność dla danej długości fali przekracza ustalony przez producenta próg intensywności promieniowania. Rzeczywiste spektrum każdego z modeli diody LED jest szersze, jednak intensywność promieniowanego światła jest o wiele niższa niż intensywność dla szczytowej długości fali.

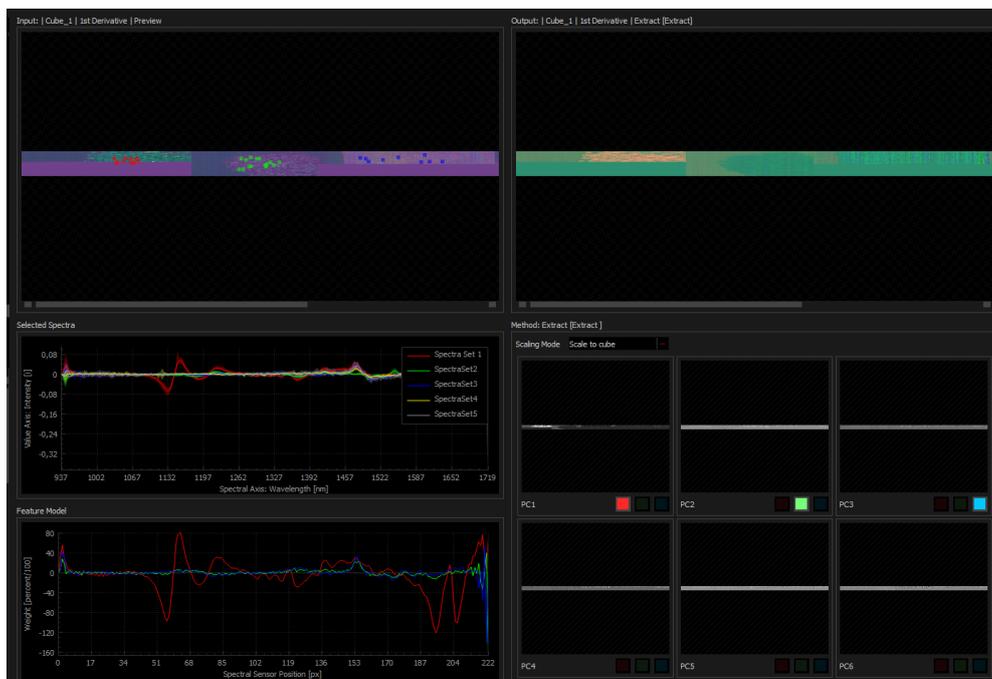
Nr kanału	Spektrum	Moc świetlna	Maksymalny prąd
1	1000 – 1100 nm	750 mW / 1000 mA	1000 mA
2	1150 - 1250 nm	180 mW / 1000 mA	1000 mA
3	1250 - 1350 nm	160 mW / 1000 mA	1000 mA
4	1400 - 1500 nm	80 mW / 1000 mA	1000 mA
5	1500 - 1600 nm	52 mW / 1000 mA	1000 mA
6	1600 - 1700 nm	28 mW / 1000 mA	1000 mA

Tabela 6 Modele LED zastosowane w oświetlaczu

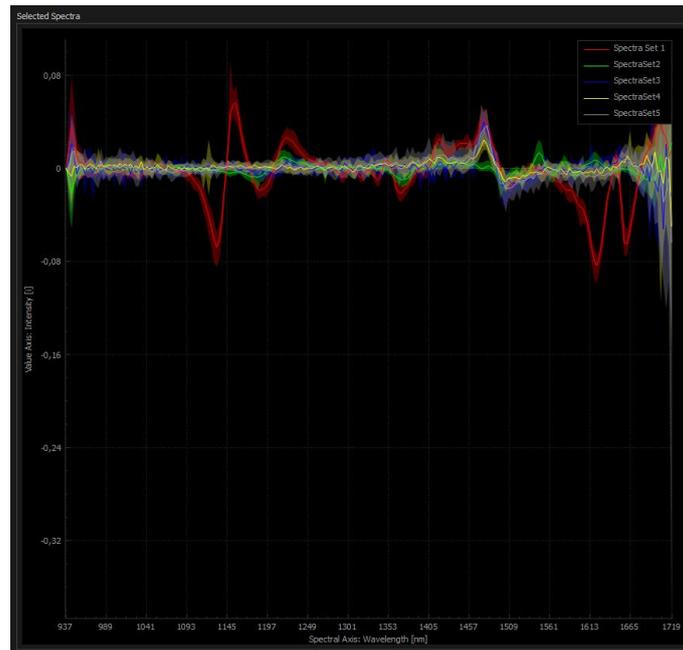


Rys. 55 Przekrój przez oświetlacz. Widoczna płytki z diodami LED, sterownik oraz optyka kolimująca

W celu analizy spektrum reflektancji poszczególnych materiałów wykorzystano środowisko Perception Studio. Umożliwia ono manualne oznaczanie pikseli zawierających dany materiał i wyznaczenie najistotniejszych długości fal na podstawie intensywności, pierwszej i drugiej pochodnej. Co najistotniejsze, to komercyjne rozwiązanie posiada wbudowany klasyfikator danych, z którego wynikami się porównywaliśmy.



Rys. 56 Fragment widoku aplikacji dotyczący przetwarzania danych - m.in. normalizacji



Rys. 57 Wizualizacja różnic w pochodnej refleksyjności materiałów

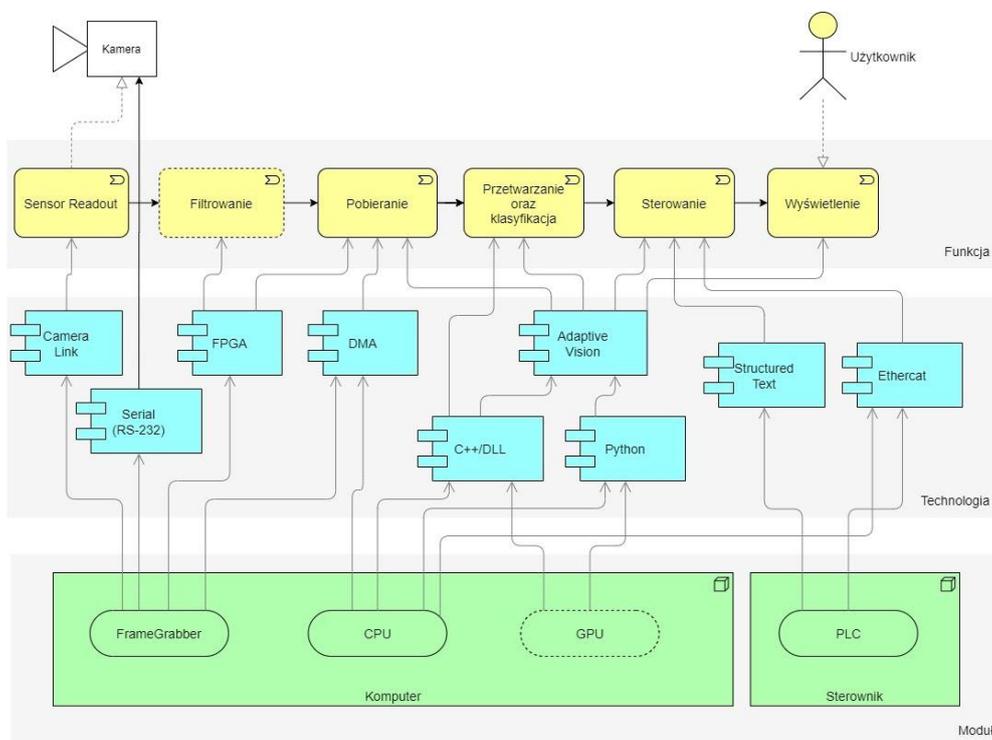
W ramach prac zrealizowano implementację aplikacji prototypu. Sporządzono przejrzysty kreator w formie HMI do uczenia algorytmu. Pozwala na wygodną pracę operatora w przypadku konieczności uczenia algorytmów klasyfikujących. Poza kreatorem, sporządzono środowisko złożone z zestawu narzędzi ułatwiających pracę z urządzeniami, danymi hiperspektralnymi oraz zastosowanymi algorytmami. Oprogramowanie pozwala na analizę danych, podgląd surowych wartości, *preprocessing* danych, etykietowanie próbek, trenowanie algorytmów sztucznej inteligencji oraz klasyfikację obiektów do wyznaczonych wcześniej klas. W trakcie realizacji skorzystano z bibliotek i *frameworków* wspomagających tworzenie oprogramowania. Podział odpowiedzialności wewnątrz oprogramowania zrealizowano poprzez wydzielenie trzech współpracujących ze sobą modułów: obsługi sprzętu, obliczeniowego oraz decyzyjnego.



Rys. 58 Przykładowy fragment HMI aplikacji związanej z fragmentaryczną wizualizacją danych

Architektura docelowego rozwiązania opiera się o potokowe przetwarzanie danych, przechodzących przez kolejne etapy rozwiązania. Środowisko jest heterogeniczne, tj. nie ma jednej platformy sprzętowej realizującej wszystkie czynności.

Na początku sensor światłoczuły dokonuje odczytu matrycy zgodnie z ustalonymi parametrami. Parametry te sterowane są za pośrednictwem frame grabbera i protokołu typu Serial (w tym przypadku RS-232). Następnie, również z wykorzystaniem urządzenia frame grabber oraz interfejsu Camera Link dane obrazowe są pobierane na układ FPGA, który dokonuje względnie prostych operacji filtrowania, takich jak wygładzanie medianowe, usuwanie zbędnego marginesu czy korekta intensywności danych. Następnie układ FPGA (znajdujący się na frame grabberze) z pomocą interfejsu DMA przekazuje dane do pamięci komputera, gdzie kontrolę nad nimi przejmuje podstawowa jednostka CPU. Na komputerze wykonywane jest dalsze przetwarzanie oraz klasyfikacja. Jest to środowisko uruchomieniowe złożone ze środowiska programistycznego Adaptive Vision, dynamicznych bibliotek DLL w postaci filtrów do wspomnianego środowiska (o ustalonym API). Środowisko Python służy do automatyzacji wybranych czynności (np. związanymi z zarządzaniem konfiguracjami, nauczonymi klasyfikatorami oraz wywołaniami zoptymalizowanych bibliotek). Aspekt wydajnościowy związany z interpreterem Python jest w tym przypadku pomijalny. Z kolei platforma sprzętowa GPU pozwala opcjonalnie na uruchomienie wybranych algorytmów przetwarzania, jeśli takie są potrzebne. W toku analizy powstaje informacja dotycząca klasyfikacji poszczególnych materiałów. Informacja ta służy do wysterowania układu PLC. Komunikacja odbywa się za pomocą tzw. Structured Text oraz protokołu EtherCAT. Układ PLC, działający bardziej deterministycznie, steruje cyfrowymi wyjściami, dzięki czemu drobne różnice w przetwarzaniu sygnałów na PC są niwelowane (o ile cały tok przetwarzania nadąża z działaniem w reżimie czasu rzeczywistego). Na dalszym etapie, celem wizualizacji obecnego stanu systemu, wykorzystywany jest graficzny interfejs użytkownika pozwalający na wyświetlenie przychodzących zdjęć, wyników klasyfikacji, stanu sterowania, czynności serwisowych i diagnostycznych czy zapisania wyników na trwałym nośniku.

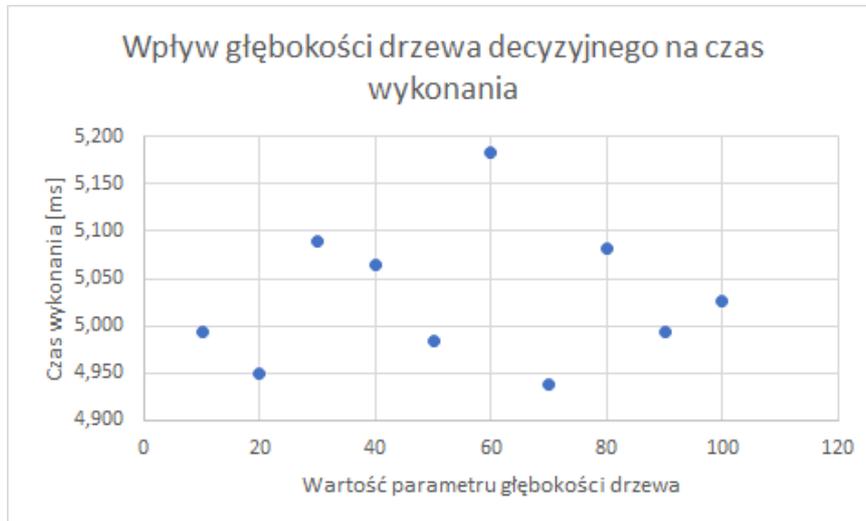


Rys. 59 Schemat przepływu danych dla proponowanego urządzenia

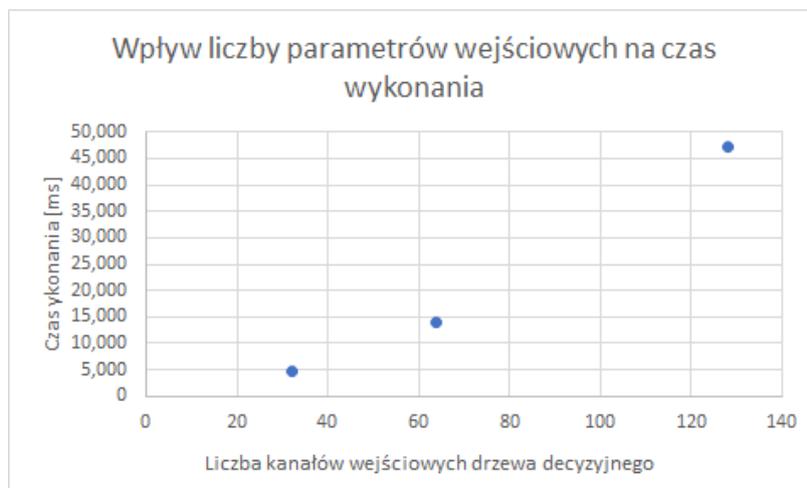


Implementacja dotyczy kilku środowisk i wymagała sprawnego poruszania się między językami programowania.

W trakcie realizacji prototypu zrealizowano testy wydajnościowe algorytmów celem określenia, czy nie następują nowe, nieoczekiwane problemy.



Rys. 60 Wpływ parametru głębokości drzewa decyzyjnego na czas wykonania



Rys. 61 Wpływ liczby parametrów wejściowych drzewa decyzyjnego na czas wykonania

Osiągniętym efektem końcowym projektu jest głowica przetestowana w warunkach rzeczywistych linii produkcyjnej. Możliwe jest jej dostosowanie do potrzeb poszczególnych aplikacji (w tym warunków środowiskowych) poprzez wymianę wzierników i instalację odpowiedniego modułu chłodzenia (opartego o układ pasywny, termoelektryczny lub rurkę wirową).

Głowica pracuje w reżimie czasu rzeczywistego, uwzględniając dynamiczne warunki podczas spadku swobodnego i na szybkiej taśmie pasa transmisyjnego.

## Podsumowanie

Realizacja projektu zakończyła się sukcesem. Zrealizowano wszystkie zaplanowane zadania oraz uzyskano zakładane cele. W szczególności zrealizowano akwizycję danych obrazowych w warunkach laboratoryjnych

i zbliżonych do rzeczywistych, zrealizowano działania informacyjno-promocyjne, wykorzystano energooszczędne oświetlenie LED. W toku prac zrealizowano klasyfikację w reżimie czasu rzeczywistego wykorzystując uczenie maszynowe, układy wsparcia obliczeń numerycznych oraz kreator do uczenia algorytmu w formie przejrzystego HMI prowadzącego operatora.

Zrealizowano badania w ramach recyklingu tworzyw sztucznych, przetwórstwie spożywczym (badanie wilgotności i obić borówek) oraz branży mięsnej (inspekcja mięsa). Podczas realizacji projektu napotkano szereg problemów technicznych, które zmusiły Wnioskodawcę do przeprowadzenia dodatkowych prac badawczych.

Opracowana głowica wizyjna składa się z układu kamer hiperspektralnych zapewniających obrazowanie w zakresie promieniowania 400-1700 nm. Układ regulacji umożliwia obserwację tego samego przekroju obiema kamerami i uzyskanie w ten sposób pełnych informacji spektralnych o badanym obiekcie.

Głowica może być wyposażona w różne rodzaje oświetlenia dobierane w zależności od wymagań aplikacji kontrolnej:

- Oświetlacz na bazie żarówek halogenowych umożliwia akwizycję od ok. 500 nm. Moc emitowana w paśmie SWIR ogranicza możliwą do uzyskania prędkość akwizycji. Zapewnia ciągłe pasmo promieniowania w swoim zakresie pracy. Jest to najtańsze rozwiązanie oświetleniowe ale posiada szereg wad:
  - emituje duże ilości ciepła konieczność stosowania wydajnego chłodzenia w przypadku zabudowy w szczelnej obudowie,
  - duża zmienność intensywności promieniowania w funkcji długości fali. Prowadzi to do niekorzystnego SNR w krańcach pasma pomiarowego,
  - wysoki pobór energii elektrycznej,
  - niska intensywność promieniowania w zakresie SWIR,
  - niewystarczająca intensywność promieniowania w zakresie UV,
  - niska żywotność źródeł światła.

Oświetlenie tego typu może być z powodzeniem stosowane w stanowiskach badawczych, urządzeniach o niskich prędkościach akwizycji lub inspekcjach prowadzonych w zakresie promieniowania 500-900 nm.

- Promiennik IR-A umożliwia wydajną pracę kamer w paśmie SWIR. Charakteryzuje się niską ceną, ale posiada szereg wad analogicznych do oświetlenia halogenowego:
  - emituje duże ilości ciepła – konieczność stosowania wydajnego chłodzenia w przypadku zabudowy w szczelnej obudowie,
  - duża zmienność intensywności promieniowania w funkcji długości fali – prowadzi to do niekorzystnego SNR w krańcach pasma pomiarowego,
  - wysoki pobór energii elektrycznej,
  - niemożliwa akwizycja obrazów w zakresie pasma widzialnego,
  - niska żywotność źródeł światła.
- Szerokopasmowe oświetlenie LED. Oświetlacz oparty o diody LED zapewnia największą konfigurowalność źródła światła. Dzięki opracowaniu dokumentacji możliwe jest wytworzenie oświetlacza o żądanej charakterystyce spektralnej. Ze względu na punktową charakterystykę źródeł LED trudne jest uzyskanie ciągłego promieniowania w całym paśmie.

Wskazane jest zastosowanie tego oświetlenia w aplikacjach, w których wcześniej zostały określone pasma kluczowe dla przeprowadzanej inspekcji. Opracowany sterownik pozwala na kształtowanie emitowanego widma



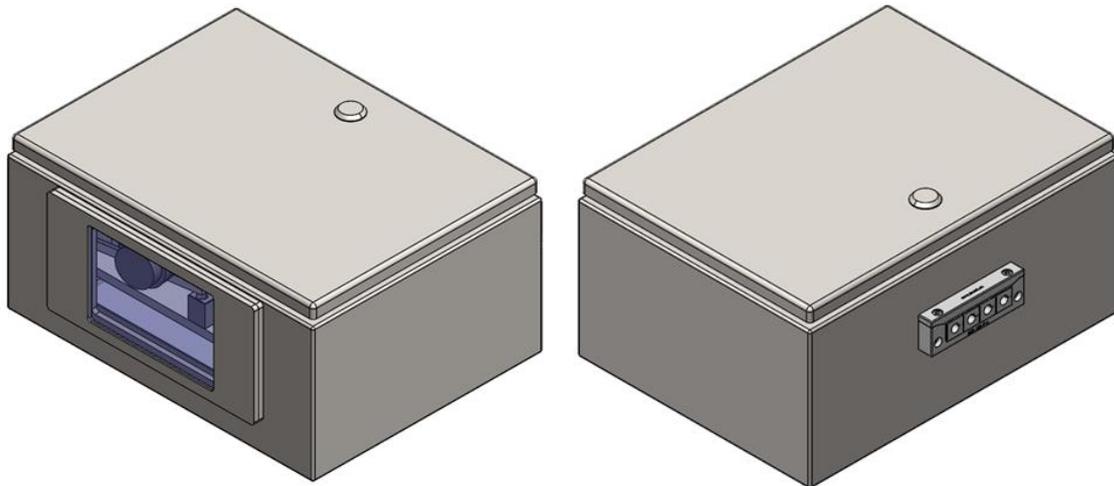
i dopasowanie go do efektywności kwantowej sensora kamery w poszczególnych pasmach. Wadą oświetlenia opartego o źródła LED jest jego wysoka cena w przypadku promieniowania SWIR. Oświetlacze bazujące na źródłach LED posiadają szereg zalet w stosunku do urządzeń żarowych:

- Możliwość skupienia promieniowanej wiązki. Emitowane promieniowanie trafia jedynie w przekrój który podlega akwizycji. Zapewnia to niskie zużycie energii i efektywną pracę oświetlacza. Opracowano produkty oparte o dwa rodzaje optyki skupiającej i kolimującej. Ułatwia to dobranie oświetlenia do konkretnej aplikacji kontrolnej.
- Niskie zużycie energii elektrycznej.
- Niska emisja ciepła ułatwiająca zabudowę w szczelnej obudowie.
- Wysoka żywotność.
- Możliwość sterowania mocą poszczególnych kanałów oświetlacza. Pozwala to na kompensację nierównomiernej czułości matrycy i uzyskanie korzystnego SNR w całym zakresie pomiarowym.

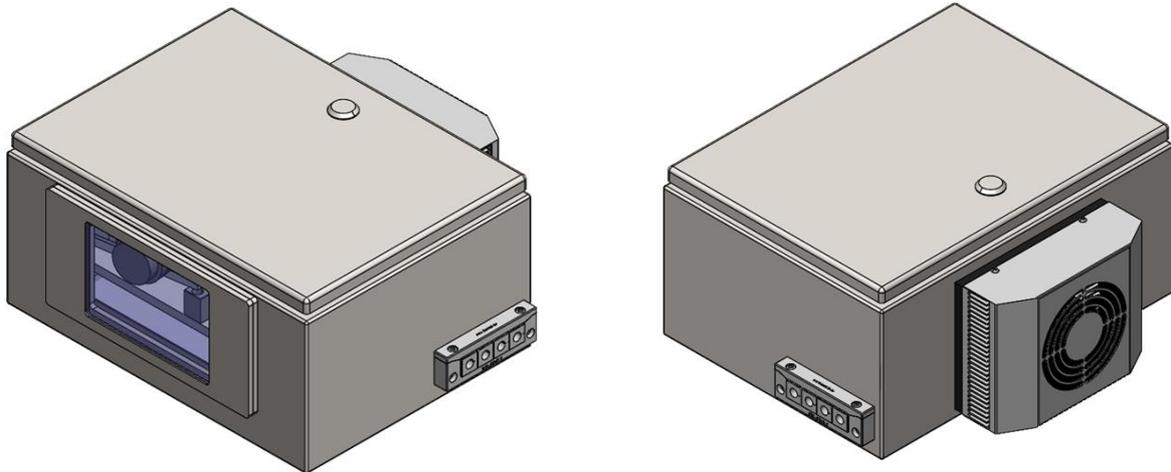
Dzięki modułowości konstrukcji głowicy możliwe jest dopasowanie produktu do potrzeb konkretnego odbiorcy.

Obudowa zapewnia klasę szczelności IP65 oraz zapewnia chłodzenie kamer znajdujących się wewnątrz.

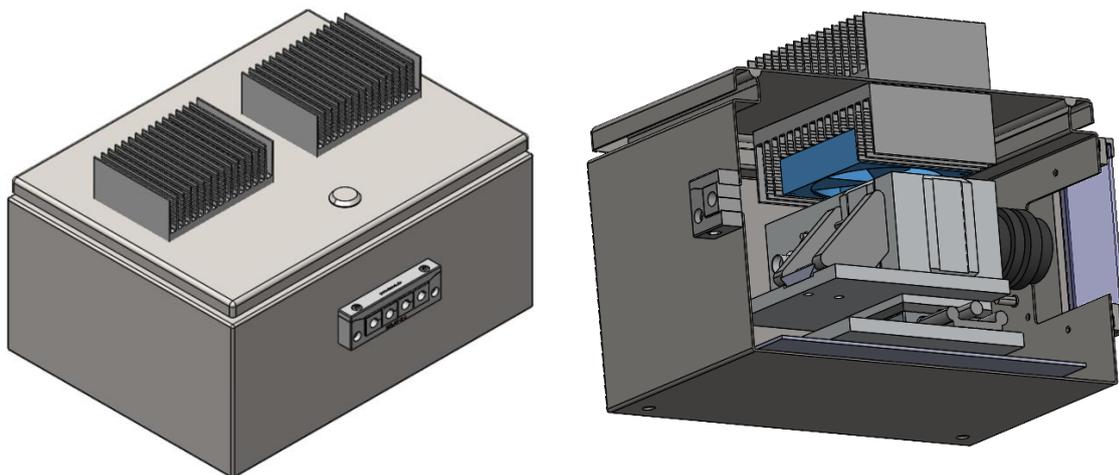
W przypadku aplikacji, w których nie jest konieczne zastosowanie 2 kamer (pasma uwzględniane w analizie pokrywa jedno urządzenie), możliwe jest zmniejszenie obudowy oraz uproszczenie układu regulacji jej położenia. Możliwe jest wówczas zastosowanie mniej wydajnego układu chłodzenia.



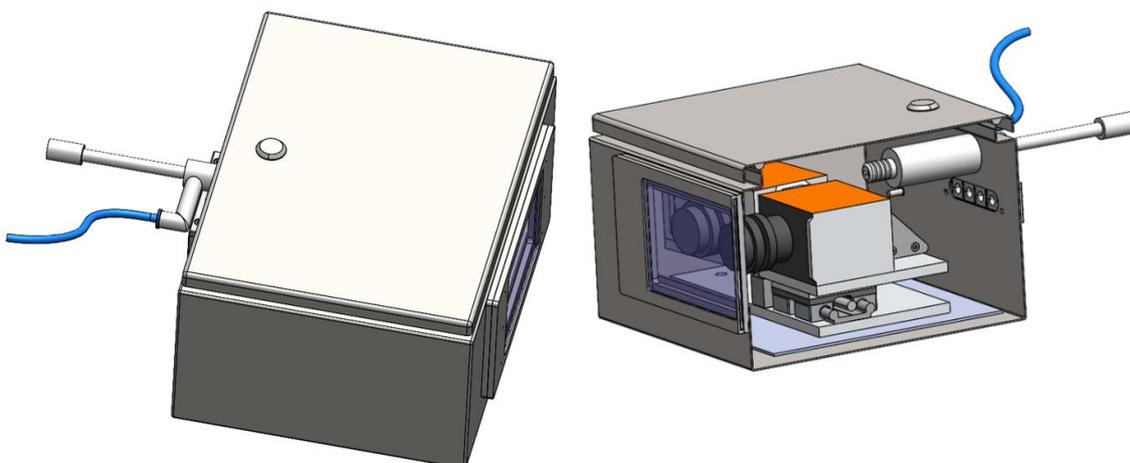
Rys. 62 Głowica w wersji chłodzonej pasywnie



Rys. 63 Głowica w wersji z termoelektrycznym układem chłodzenia



Rys. 64 Głowica wyposażona w pasywny, wspomagany układ chłodzenia



Rys. 65 Głowica wyposażona w chłodzenie z wykorzystaniem rurki wirowej



Rys. 66 Wykonana głowica wizyjna w wersji z chłodzeniem pasywnym



Rys. 67 Oświetlacz LED SWIR zamontowany wewnątrz urządzenia sortującego



*Rys. 68 Jeden z oświetlaczy halogenowych wykorzystywanych podczas badań*

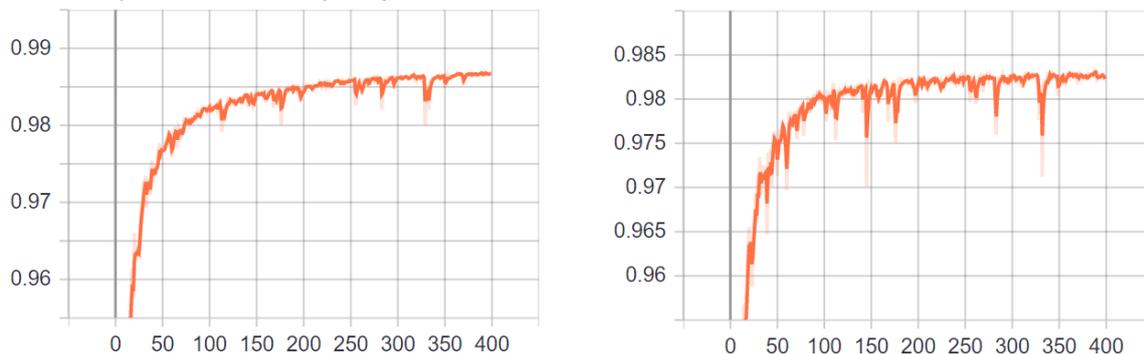
Na podstawie przeprowadzonych badań nad układami chłodzenia, przygotowano tabelę pozwalającą na dobór odpowiedniego rozwiązania do warunków środowiskowych.

	Chłodzenie pasywne	Chłodzenie termoelekt.	Chłodzenie pasywne wspom.	Chłodzenie rurką wirową
Zakres temperatur -20~10°C				
Zakres temperatur 10~25°C	niekorzystne w przypadku wykorzystywania w analizie pasm o niskiej czułości			
Zakres temperatur 25~35°C			niekorzystne w przypadku wykorzystywania w analizie pasm o niskiej czułości	
Kondensacja wilgoci, mycie wodą				
Wysokie zapylenie	Wymagana kontrola osiadania pyłu na skrzynce		Wymagana kontrola osiadania pyłu na radiatorach	
Uwagi		Standardowa moc chłodząca 50W. Możliwość zastosowania urządzenia o mocy 75W.		Konsumpcja sprężonego powietrza ok 150 NI/min

Opracowane oprogramowanie ma następujące cechy, funkcjonalności i możliwości:

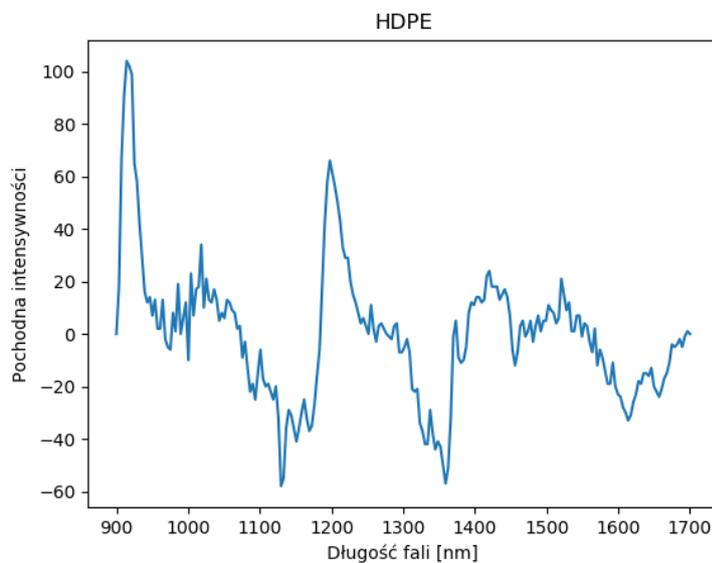
- zasadnicza aplikacja typu desktop z graficznym interfejsem użytkownika;
- praca pod kontrolą systemu operacyjnego Microsoft Windows 10 x86-64;
- akwizycja danych testowych oraz rzeczywistych;
- symulowanie pracy bez podłączonego fizycznego sprzętu akwizycyjnego;
- kontrola sprzętu akwizycyjnego;
- wbudowana kalibracja kamery hiperspektralnej;
- *preprocessing* (np. wygładzanie) danych za pomocą filtrów cyfrowych;
- uczenie modeli uczenia maszynowego;

- uruchamianie nauczonych modeli;
- zapamiętywanie, przechowywanie i wybór nauczonych modeli pod konkretne materiały;
- możliwość doboru algorytmu uczenia;
- klasyfikacja danych uzyskiwanych z kamery na podstawie spektrum oraz rozmiaru widzianych obiektów;
- podgląd na żywo obrazu z kamery;
- podgląd na żywo wyników klasyfikacji;
- sterowanie wyjściowymi sygnałami cyfrowymi;
- zapis uzyskiwanych danych;
- zapis rezultatów klasyfikacji.



Rys. 69 Przykładowy przebieg uczenia na zbiorze trenującym (po lewej) i walidacyjnym (po prawej)

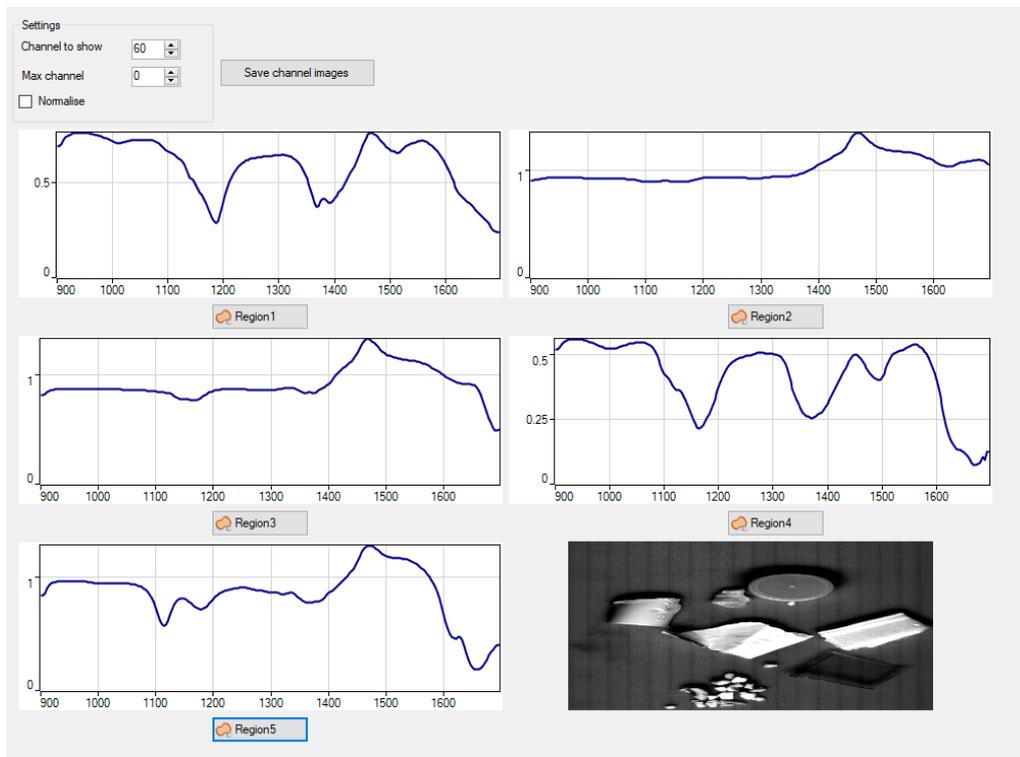
Dzięki oprogramowaniu operator jest w stanie sprawnie i bezproblemowo obsługiwać maszynę, włącznie z weryfikacją uzyskiwanych wyników oraz przetwarzaniem.



Rys. 70 Przykładowy wykres pierwszej pochodnej jednej z próbek materiału HDPE

Zbudowane oprogramowanie pomaga w praktycznych zastosowaniach. System nie byłby możliwy do realizacji w szybkim czasie bez kamery hiperspektralnej, uczenia maszynowego oraz sprawnego interfejsu graficznego oprogramowania. Przykładowy eksperyment powtórzono po dwóch dniach na degradującym się materiale.

Dzięki oprogramowaniu, powtórzenie eksperymentu było sprawne i nie wymagało dodatkowych czasochłonnych czynności.



Rys. 71 Fragment interfejsu graficznego oprogramowania pozwalającego na podgląd danych hiperspektralnych w wybranych regionach

<b>Technologia obrazowania</b>	Liniowe skanowanie przestrzenne
<b>Rozdzielczość przestrzenna</b>	1024 px (zakres 400-1000nm), 640px (zakres 900-1700nm)
<b>Rozdzielczość spektralna</b>	224 pasma
<b>Kąt obserwacji</b>	38° (standardowy)
<b>Prędkość akwizycji</b>	Zależna od liczby zbieranych pasm (efektywnie do 3kHz)
<b>Odległość robocza</b>	Regulowana w zakresie 420-1000mm
<b>Interfejs komunikacyjny</b>	2x Gigabit Ethernet lub 2x CameraLink Base. W zestawie karta przechwytyjąca z interfejsem PCIe
<b>Zasilanie</b>	12 VDC 48 W max (chłodzenie pasywne, temperatura otoczenia ponad 5°C), 12VDC 78 W max (chłodzenie pasywne, temperatura otoczenia poniżej 5°C), 12VDC 60W max (chłodzenie pasywne wspomagane), 12VDC 48W max + 24VDC 55W (chłodzenie modułem termoelektrycznym)
<b>Wymiary zewnętrzne</b>	300x400x200 mm (wersja chłodzona pasywnie), 300x400x255mm (wersja z chłodzeniem pasywnym wspomaganiem), 377x400x200mm (wersja chłodzona modułem termoelektrycznym), 415x400x200mm (wersja chłodzona rurką wirową)
<b>Masa (głowica z 2 kamerami)</b>	16,5 kg (wersja chłodzona pasywnie), 18,7 kg (wersja z chłodzeniem pasywnym wspomaganiem), 19,7 kg (wersja chłodzona modułem termoelektrycznym), 17 kg (wersja chłodzona rurką wirową)
<b>Klasa szczelności</b>	IP65 (wersja chłodzona pasywnie, pasywnie z wspomaganiem i rurką wirową), IP54 (wersja chłodzona termoelektrycznie)
<b>Materiał obudowy</b>	Stal nierdzewna (wersja chłodzona pasywnie), stal nierdzewna + elementy aluminiowe (pozostałe wersje głowicy)
<b>Zakres temperatur otoczenia (praca)</b>	-20~35°C (zależne od wersji chłodzenia, możliwość wykonania rozwiązania specjalnego na inne zakresy temperatur pracy)

Tabela 7 Specyfikacja opracowanej głowicy pomiarowej

W przypadku zabudowy głowicy w urządzeniu sortującym Wnioskodawcy, kamery znajdują się w części szczelnej sortera i nie wymagają stosowania dodatkowych obudów.

Głowica może dodatkowo zostać wyposażona w elektroniczny układ sterowania. Układ ten, oparty na sterowniku PLC, komunikuje się z aplikacją kontrolną (poprzez interfejs Ethernet) i zapewnia realizację następujących funkcji:

- Wyłączanie oświetlenia w momencie zatrzymania linii w celu uniknięcia problemu nagrzewania przenośnika oświetleniem żarowym. Konieczne doprowadzenie do sterownika sygnału z impulsatora lub enkodera.
- Realizacja sygnału służącego do wysterowania odrzutnika wadliwego produktu. Wymagane doprowadzenie sygnału z enkodera.

- Komunikacja z oprogramowaniem kontrolnym.

Wnioskodawca analizuje, czy jako opcjonalne wyposażenie głowicy wprowadzić do oferty komputer służący do analizy danych. Za takim rozwiązaniem przemawia kompleksowość dostarczanego rozwiązania - można je adresować bezpośrednio do użytkowników końcowych. Multiplikuje to jednak liczbę dostępnych opcji (konieczne jest wówczas dostarczenie wraz z komputerem szafy sterowniczej z układem chłodzenia dostosowanym do warunków środowiskowych panujących w miejscu instalacji). Ze względu na różną złożoność obliczeniową realizowanych kontroli wskazana byłaby możliwość skalowania mocy obliczeniowej a tym samym ceny jednostki analizującej.

## Bibliografia

- [1] Ruben Ruiz-Gonzalez et al., „An SVM-Based Classifier for Estimating the State of Various Rotating Components in Agro-Industrial Machinery with a Vibration Signal Acquired from a Single Point on the Machine Chassis,” *Sensors (Basel, Switzerland)*, 11 2014.
- [2] Imec, „Snapscan Hyperspectral Imaging Camera,” 2018.
- [3] Anastasios Doulamis et al., „A Non-Invasive Photonics-Based Device for Monitoring of Diabetic Foot Ulcers: Architectural/Sensorial Components; Technical Specifications,” *Inventions*, tom 6, nr 2, 2021.