

Tytus Berbeć

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

WYKORZYSTANIE ZOBRAZOWAŃ SPEKTRALNYCH W ROLNICTWIE 4.0*

Słowa kluczowe: rolnictwo precyzyjne, teledetekcja, dron (BSP), kamera multispektralna, NDVI, uczenie maszynowe, ocena kondycji upraw, szacowanie szkód

Wstęp

Dynamiczny rozwój rolnictwa precyzyjnego wymaga wdrażania zaawansowanych technologii do monitorowania stanu upraw w czasie rzeczywistym. Bezzałogowe statki powietrzne (BSP) wyposażone w sensory spektralne stają się kluczowym narzędziem, oferując zobrażenia o wysokiej rozdzielczości oraz niezbędne dane oceny kondycji roślin. Celem pracy była ocena skuteczności zintegrowanej metodyki, łączącej teledetekcję niskopułapową z algorytmami uczenia maszynowego, w celu oceny faz fenologicznych i ogólnej kondycji pszenicy ozimej, ilościowego oszacowania szkód wyrządzonych przez zwierzęta w rzepaku oraz detekcji porażenia pszenicy przez fuzariozę kłosów.

Nowoczesne rolnictwo stoi przed trudnymi wyzwaniami, takimi jak potrzeba zwiększenia produkcji żywności, adaptacja do zmian klimatu oraz presja społeczeństwa na ograniczanie negatywnego wpływu na środowisko. W odpowiedzi na stawiane wyzwania, technologia rolnictwa precyzyjnego zyskuje na znaczeniu jako model zarządzania oparty na gromadzeniu, przetwarzaniu i analizie danych w celu optymalizacji produkcji roślinnej poprzez podejmowanie właściwych decyzji agronomicznych. Jedną z kluczowych technologii napędzających rozwój rolnictwa 4.0 są bezzałogowe statki powietrzne (BSP, ang. UAV), które stały się wszechstronnymi platformami do pozyskiwania danych o wysokiej rozdzielczości czasowej i przestrzennej.

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.8. pt. „Wykorzystanie dronów w rolnictwie” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2025 r.

W przeszłości monitorowanie upraw z powietrza opierało się na zobrazowaniach satelitarnych lub lotniczych. Pomimo ich dużej wartości metody te charakteryzują się ograniczeniami związanymi z wysokim kosztem wprowadzenia do użytku, stosunkowo niską rozdzielczością przestrzenną czy dużą zależnością od terminów przelotów i zmiennością warunków atmosferycznych, głównie zachmurzenia czy nagromadzenia aerozolu w powietrzu. BSP oferują w tym zakresie znaczącą przewagę, umożliwiając elastyczne planowanie misji oraz pozyskiwanie danych ze znacznie większą dokładnością. Drony są również tańsze w eksploatacji w porównaniu z tradycyjnymi metodami in-situ opartymi na pobieraniu prób. Drony mogą być wyposażone w szeroką gamę sensorów, w tym kamery działające w zakresie światła widzialnego (RGB) oraz kamery multispektralne rejestrujące odbicie w pasmach niewidocznych dla ludzkiego oka, takich jak np. kanał czerwonej krawędzi (tzw. red edge) czy bliska podczerwień (NIR).

Dane pozyskane z nalogów BSP mogą być integrowane z systemami informacji geograficznej (GIS). Połączenie informacji o stanie roślinności z danymi glebowymi pozwala na tworzenie spersonalizowanych map aplikacyjnych dla nawozów czy środków ochrony roślin, uwzględniając specyficzną zmienność warunków siedliskowych na danym polu. Centralnym elementem tej technologii jest analiza odbicia spektralnego roślin. Rośliny zdrowe, o wysokiej aktywności fotosyntetycznej i dobrym zaopatrzeniu w wodę intensywnie absorbują światło w zakresie czerwonym i odbijają je w zakresie bliskiej podczerwieni (NIR). Rośliny znajdujące się w stanie stresu (spowodowanego np. niedoborem wody, atakiem patogenów czy deficytem makro- i mikroelementów) wykazują odmienną sygnaturę spektralną. Różnice te są kwantyfikowane za pomocą wskaźników wegetacyjnych, z których najpopularniejszym jest znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji (NDVI). Analiza map NDVI pozwala na precyzyjne lokalizowanie obszarów problemowych na polu, często zanim symptomy stresu staną się widoczne gołym okiem. Ma to kluczowe znaczenie m.in. w monitorowaniu suszy rolniczej czy ocenie ogólnego stanu kondycji roślin.

Wyniki i dyskusja

W doświadczeniu dotyczącym przeprowadzenia dokładnej analizy materiału fotogrametrycznego pod kątem oceny ogólnej kondycji roślin, wystąpienia szkodników, chorób roślin z wykorzystaniem uczenia maszynowego do oceny zasięgu wystąpienia szkody w uprawie wykorzystano dwa rodzaje dronów z zamontowanymi kamerami spektralnymi.

Do analizy niewielkich obszarów upraw wykorzystano drona o konstrukcji multiwiralnikowej z zamontowaną kamerą wielospektralną (rys. 1).



Rys. 1 Dron o konstrukcji multiwirnikowej firmy DJI model Matrice 600 Pro z zamontowaną kamerą wielospektralną Micasence RedEdge-M

Fot. Tytus Berbec

Wykorzystany nośnik to zaawansowany dron zaprojektowany z myślą o użytkownikach potrzebujących nośnika, do którego można podczyć aparaturę badawczą o różnych parametrach. Jest to bardzo solidna platforma o wysokiej wydajności, modularności i niezawodności. Dzięki modułowej budowie model ten można łatwo konfigurować i dostosowywać do różnego typu zadań. Wyposażony w bardzo wydajny system napędowy składający się z sześciu silników, które zapewniają dużą siłę nośną, umożliwiając transport ciężkiej aparatury badawczej (np. wykorzystanej w doświadczeniu kamery wielospektralnej o wysokiej rozdzielczości). W dronie zastosowano zaawansowany system kontroli lotu składający się z kontrolera z możliwością programowania misji, zapewniając stabilność, wysoką precyzję lotu nawet w trudnych warunkach pogodowych. Dzięki wyposażeniu drona w różne czujniki i sensory możliwe było bezpieczne wykonywanie misji w trudnych warunkach terenowych. W tabeli 1 przedstawiono podstawowe parametry fizyczne i konstrukcyjne platformy bezzałogowej. Jest to sześciowirnikowa konstrukcja (heksakopter) o znacznym rozstawie osi (1133 mm), co zapewnia stabilność w locie. Kluczową cechą jest składana konstrukcja ramion, co znacząco ułatwia transport (redukcja wymiarów z 1668 mm do 640 mm). Maksymalna masa startowa (MTOW) wynosząca 15,1 kg, przy masie własnej ok. 9,1–9,6 kg, pozwala na udźwig ładunku (aparatury badawczej) rzędu 5,5–6,0 kg. Platforma jest kompatybilna z szeroką gamą profesjonalnych sensorów (seria Zenmuse), a standardowo wysuwane podwozie zapewnia swobodny obrót kamery w zakresie 360°.

Tabela 1

Charakterystyka konstrukcyjna i parametry fizyczne drona

Cecha	Specyfikacja
Konstrukcja	
Diagonalny rozstaw osi	1133 mm
Wymiary drona (rozłożony)	1668 mm × 1518 mm × 759 mm
Wymiary drona (złożony)	640 mm × 582 mm × 623 mm
Wymiary drona (całkowicie złożony)	620 mm × 320 mm × 505 mm
Ilość pakietów baterii	6
Waga drona (z bateriami TB47S)	9,1 kg
Waga drona (z bateriami TB48S)	9,6 kg
Maksymalna masa startowa	15,1 kg
Napęd	
Model silnika	DJI 6010
Model śmigieł	DJI 2170
Inne	
Możliwość integracji (Gimbal)	Zenmuse X3; seria X5; XT; Ronin-MX; seria Z15 (Z15-A7, Z15-BMPCC, Z15-5D III, Z15-GH4)
Wysuwane podwozie	standard
Temperatura pracy	od -10°C do 40°C

Źródło: oficjalna strona producenta <https://www.dji.com/pl/support/product/matrice600-pro>

Tabela 2 zestawia kluczowe osiągi lotnicze oraz specyfikację systemów awioniki i kontroli. Platforma wyposażona jest w zaawansowany kontroler lotu A3 PRO zapewniający wysoką precyzję pozycjonowania ($\pm 0,5$ m w pionie i $\pm 1,5$ m w poziomie w trybie GPS). Maksymalna prędkość lotu poziomego ($18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) oraz odporność na wiatr (do $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) umożliwiają prowadzenie badań w zmiennych warunkach pogodowych. Najważniejszym parametrem operacyjnym jest maksymalny czas lotu, który jest silnie zależny od obciążenia i typu baterii – waha się od 16–18 min (z ładunkiem 5,5–6 kg) do 35–40 min (bez ładunku). System sterowania (nadajnik) zapewnia duży zasięg transmisji (do 5 km) oraz porty wyjściowe wideo (HDMI, SDI), kluczowe dla podglądu na żywo.

Tabela 2

Parametry lotu i systemy sterowania platformy

Cecha	Specyfikacja
Osiągi i parametry lotu	
Dokładność pozycjonowania (Tryb P, z GPS)	w pionie: $\pm 0,5$ m, w poziomie: $\pm 1,5$ m
Maksymalna prędkość kątowna	przechył (Pitch): $300^{\circ}/s$, Obrót (Yaw): $150^{\circ} \cdot s^{-1}$
Maksymalny kąt przechyłu	25°
Maksymalna prędkość wznoszenia	$5 \text{ m} \cdot s^{-1}$
Maksymalna prędkość opadania	$3 \text{ m} \cdot s^{-1}$
Maksymalna prędkość wiatru	$8 \text{ m} \cdot s^{-1}$
Maksymalna wysokość lotu (n.p.m.)	2500 m
Prędkość maksymalna (bez wiatru)	$18 \text{ m} \cdot s^{-1}$
Maksymalny czas lotu (z bateriami TB47S)*	bez ładunku: 35 min; 6 kg ładunku: 16 min
Maksymalny czas lotu (z bateriami TB48S)**	bez ładunku: 40 min; 5,5 kg ładunku: 18 min
System kontroli lotu	
Model	A3 PRO
Nadajnik (kontroler)	
Częstotliwość operacyjna	920,6 MHz–928 MHz (Japonia); 5,725 GHz–5,825 GHz; 2,400 GHz–2,483 GHz
Maksymalny zasięg transmisji (bez zakłóceń)	zgodność z FCC: 5 km; Zgodność z CE: 3,5 km
EIRP (moc nadawania)	10 dBm @ 900 M; 13 dBm @ 5,8 G; 20 dBm @ 2,4 G
Port wyjściowy wideo	HDMI, SDI, USB
Tryb podwójnego operatora	sterowanie Master-Slave
Obsługa urządzeń mobilnych	telefon i tablet (max szerokość 170 mm)
Pobór mocy	9 W
Wbudowana bateria	6000 mAh, 2S LiPo
Temperatura pracy	od -10°C do 40°C

*TB47S – podstawowa bateria montowana do BSP; **TB48S – akcesoryjna bateria o zwiększonej pojemności, z którą współpracuje platforma BSP

Źródło: oficjalna strona producenta: <https://www.dji.com/pl/support/product/matrice600-pro>

W tabeli 3 przedstawiono charakterystykę komponentów systemu zasilania, który jest kluczowy dla czasu i bezpieczeństwa operacji lotniczych. System opiera się na sześciu pakietach baterii (LiPo 6S), co zapewnia redundancję zasilania. Dostępne są dwa warianty baterii: TB47S (4500 mAh/99,9 Wh) oraz TB48S (5700 mAh/129,96 Wh). Bateria TB48S, choć cięższa (680 g vs 595 g), oferuje większą pojemność i moc, co przekłada się na dłuższy czas lotu, szczególnie przy pełnym obciążeniu (jak wykazano w tab. 2). Oba typy baterii posiadają system inteligentnego zarządzania (BMS) oraz szeroki zakres temperatur pracy.

Tabela 3

Parametry lotu i systemy sterowania platformy

Cecha	Specyfikacja
Ładowarka	
Model	A14-100P1A
Wyjście napięcia	26,3 V
Moc	100 W
Inteligentna Bateria (model TB47S)	
Pojemność	4500 mAh
Napięcie	22,2 V
Typ	LiPo 6S
Moc	99,9 Wh
Waga	595 g
Temperatura pracy	od -10°C do 40°C
Temperatura przechowywania	poniżej 3 miesięcy: od -20°C do 45°C ; powyżej 3 miesięcy: od 22°C do 28°C
Temperatura ładowania	od 5° do 40°C
Maksymalna moc ładowania	180 W
Inteligentna Bateria (model TB48S)	
Pojemność	5700 mAh
Napięcie	22,8 V
Typ	LiPo 6S
Moc	129,96 Wh
Waga netto	680 g

cd. tab. 3

Cecha	Specyfikacja
Temperatura pracy	od -10°C do 40°C
Temperatura przechowywania	poniżej 3 miesięcy: od -20°C do 45°C ; powyżej 3 miesięcy: od 22°C do 28°C
Temperatura ładowania	od 5°C do 40°C
Maksymalna moc ładowania	180 W

Źródło: oficjalna strona producenta: <https://www.dji.com/pl/support/product/matrice600-pro>

Do multiwornikowca opisanego powyżej podczepiono kamerę multispektralną firmy Micasense model RedEdge-M (rys. 2).



Rys. 2. Kamera multispektralna wykorzystana w doświadczeniu

Źródło: <https://i.ytimg.com/vi/ovAaM0iqeUE/hq720.jpg?sqp=-oaymwEhCK4FEIIDSFryq4qpAxMIA-RUAAAAAGAEIAADIQj0AgKJD&rs=AO4CLAJ8XCE3IrLokR7yVny0uMv5ma8qg>

Jest to zaawansowana kamera multispektralna zaprojektowana specjalnie do zastosowań w rolnictwie precyzyjnym. Dzięki zdolności rejestrowania światła odbitego w różnych, niewidocznych dla ludzkiego oka zakresach spektralnych, umożliwia szczegółową analizę stanu roślin i gleby. Kamera multispektralna rejestruje obraz w kilku wąskich pasmach spektralnych, które są szczególnie istotne dla obserwatora badającego zmiany w roślinach. Dzięki temu można uzyskać szereg istotnych informacji dotyczących zdrowotności roślin, pomagających we wczesnym wykrywaniu chorób, stresu wodnego, czy niedoborów składników odżywczych. Ponadto analiza refleksyjności może pomóc w ocenie tempa wzrostu roślin (odczytaniu fazy rozwojowej roślin). Dokładna analiza widm spektralnych daje również możliwość analizy stanu gleby, w tym uwilgotnienia roślin i gleby oraz składników organicznych zawartych

w glebie. Na podstawie zobrazowań spektralnych możliwe było również prognozowanie plonów.

W tabeli 4 przedstawiono kluczowe parametry techniczne wykorzystywanego sensora multispektralnego. Cechami kwalifikującymi go do zastosowań na bezzałogowych statkach powietrznych (BSP) są przede wszystkim niska masa (170 g wraz z czujnikiem światła padającego DLS) oraz niewielki pobór mocy (nominalnie 4 W). Sensor rejestruje obraz w pięciu wąskich pasmach spektralnych (niebieskim, zielonym, czerwonym, czerwonej krawędzi, bliskiej podczerwieni). Obecność kanałów red edge (środek 717 nm) i bliskiej podczerwieni (środek 840 nm) ma fundamentalne znaczenie dla teledetekcji rolniczej, umożliwiając kalkulację zaawansowanych wskaźników wegetacyjnych (np. NDVI, NDRE), które są czułe na zawartość chlorofilu i stan zdrowotny roślin. Urządzenie zapewnia wysoką rozdzielczość przestrzenną (GSD 8,2 cm·px⁻¹ przy locie na wysokości 120 m AGL). Szybkość akwizycji (1 zobrazowanie·s⁻¹) oraz zapis danych w 12-bitowym formacie RAW gwarantują wysoką rozdzielczość radiometryczną niezbędną do precyzyjnej analizy subtelnych różnic w odbiciu spektralnym monitorowanych upraw.

Tabela 4

Opis parametrów technicznych kamery Micasense RedEdge-M

Waga	170 g (Including DLS)
Wymiary	9,4 cm × 6,3 cm × 4,6 cm (3,7" × 2,5" × 1,8")
Zasilanie	4,2 V–15,8 V, 4 W nominal, 8 W peak
Kanały spektralne	kanały spektralne: niebieski, zielony, czerwony, kanał czerwonej krawędzi (ang. <i>red edge</i>), bliska podczerwień
Rozdzielczość poszczególnych kanałów Ground Sample Distance (GSD):	8,2 cm·px ⁻¹ (per band) at 120 m (400 ft.) AGL
Częstotliwość pracy kanałów	1 zobrazowanie na sekundę (wszystkie kanały), 12-bit RAW
Długość fal poszczególnych zakresów spektralnych	niebieski (centrum kanału 475 nm ± 20 nm), zielony (centrum kanału 560 nm ± 20 nm), czerwony (centrum kanału 668 nm ± 10 nm), czerwona krawędź (centrum kanału 717 nm ± 10 nm), bliska podczerwień (centrum kanału 840 nm ± 40 nm)

Źródło: https://support.micasense.com/hc/en-us/article_attachments/115004168274

Wykorzystując kamerę wielospektralną o parametrach technicznych opisanych w tabeli 4, możliwe było dokonanie analizy potrzeb roślin, dzięki czemu można było w sposób precyzyjny dozować nawozy (zmniejszenie nakładów na nawozy zwiększa ekonomikę gospodarstwa i przyczynia się do ochrony środowiska). Zastosowanie

kamery umożliwiało wychwycenie problemów pojawiających się w uprawie oraz podjęcie szybkich działań mających na celu niezwłoczną ich eliminację lub zminimalizowanie negatywnego działania.

Do mapowania dużych obszarów wykorzystano drona o konstrukcji płatownca z zamontowaną kamerą multispektralną firmy Micasense model Altum-PT (rys. 3)



Rys. 3. Dron o konstrukcji płatownca firmy BZB UAS model ecoSKY 2.0

Źródło: <https://www.bzbuas.com/pl>

Dron o konstrukcji płatownca firmy BZB UAS model ecoSKY 2.0 to bezzałogowy statek powietrzny, który swoją konstrukcją przypomina samolot. Dzięki aerodynamicznemu kształtowi i większej nośności w porównaniu z multirotorami jest w stanie pokonać znacznie dłuższe dystanse, co czyni go doskonałym narzędziem w monitorowaniu dużych obszarów rolnych. Model ecoSKY jest jednym z pierwszych samolotów pionowego startu i lądowania (VTOL) polskiej produkcji. W całości został wykonany z zaawansowanych materiałów kompozytowych i wyposażony w najnowocześniejszą technologię komponentów elektronicznych. Napędzany jest czterema silnikami elektrycznymi w układzie poziomym, które pozwalają samolotowi pionowo startować i lądować, co czyni go niezwykle użytecznym narzędziem na obszarach rolnych oraz w jeden silnik w układzie pionowym służący do napędzania maszyny w czasie lotu poziomego. Podczas lotu poziomego silniki poziome są nieużywane, ustawione w tzw. chorągiewkę, co pozwala oszczędzić duże ilości energii i zmaksymalizować długość lotu na jednym pakiecie nawet do 180 min. Prędkość przelotowa samolotu o rozpiętości skrzydeł ponad 3 metrów wynosi $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (ok. $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$), natomiast prędkość maksymalna, do której można rozpędzić bezzałogowy samolot to $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($108 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$). W tabeli 5 przedstawiono specyfikację techniczną platformy bezzałogowej typu VTOL (płatownca pionowego startu i lądowania). Jest to konstrukcja hybrydowa łącząca elastyczność operacyjną wielowirnikowca (pionowy start i lądowanie) z wydajnością lotu płatownca (przejście w lot poziomy po osiągnięciu wysokości docelowej). Kluczowym parametrem definiującym potencjał tej platformy do zastosowań w rolnictwie precyzyjnym na dużą skalę jest minimalny czas lotu wynoszący 120 min z ładunkiem o masie 1400 g. Tak długa wytrzymałość lotu pozwala na efektywne mapowanie rozległych arealów (setek hektarów) podczas jednej misji. Platforma jest przeznaczona do przenoszenia zaawan-

sowanych sensorów multispektralnych, co potwierdza wymagana kompatybilność z sensorem ALTUM-PT. Wysokie parametry operacyjne, takie jak odporność na wiatr w locie poziomym (do $14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) oraz prędkość przelotowa $22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wskazują na przystosowanie do pracy w realnych warunkach polowych. Zdolność do planowania misji autonomicznych na podstawie plików wektorowych (SHP) oraz opcjonalna telemetria przez sieć GSM (bez limitu zasięgu) podkreślają profesjonalny i w pełni autonomiczny charakter systemu.

Tabela 5

Parametry techniczne drona o konstrukcji płatowca ecoSKY 2.0

Parametry drona	Opis
Procedura startu i lądowania	pionowo
Po osiągnięciu wysokości docelowej BSP	przejście w lot poziomy
Bezzałogowy Statek Powietrzny (BSP)	napędzany wyłącznie silnikami elektrycznymi
Minimalna ładowność	co najmniej 1400 g
Minimalny czas unoszenia się w powietrzu	z ładunkiem nie mniej niż 120 min
Zakres pracy BSP w temperaturach	$0\text{--}40^{\circ}\text{C}$
Bezzałogowy Statek Powietrzny (BSP) o maksymalnej masie startowej (MTOM)	16 kg
Funkcja powrotu BSP do punktu startu (Return To Home) w przypadku utraty sygnału między nadajnikiem a odbiornikiem bądź inną przyczyną niezależną od operatora, na żądanie pilota w każdej fazie lotu	TAK
Minimalna prędkość przelotowa	$22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($72 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)
Odporność na wiatr podczas startu i lądowania	$5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Odporność na wiatr podczas lotu poziomego	$14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Zasięg danych telemetrycznych	20 km lub przy użyciu danych GSM bez limitu km
Bezzałogowy statek powietrzny kamera	wyposażony w kamerę RGB służącą do przesyłania obrazu
Bezzałogowy statek powietrzny adaptacja innej aparatury	podłączenie i obsługa sensora ALTUM-PT (kompatybilny z danym urządzeniem w celu zbierania danych podczas wykonywania lotów autonomicznych)

cd. tab. 5

Parametry drona	Opis
Stopień ochrony	co najmniej ochrona przez pyłem, co najmniej ochrona przed bryzgami wody z dowolnego kierunku
Zestaw akumulatorów	2 sztuki (akumulator lub kilka akumulatorów, wykonanie jednego pełnego lotu o długości przynajmniej 120 min
Zestaw wyposażony w ładowarkę	ładowanie 2 baterii w tym samym czasie „jednocześnie” (kompatybilna z dostarczonymi zestawami baterii)
Zestaw BSP aparatura sterująca	zdolny do przeprowadzenia lotu sterowanego za pomocą aparatury sterującej (nadajnika) przez pilota oraz lotów autonomicznych
Aparatura sterująca	zapewnia możliwość planowania automatycznych lotów na podstawie pliku wektorowego o rozszerzeniu .SHP (wgranego do aparatury)
Zestaw BSP	zdolny do przeprowadzenia lotu autonomicznego (zaprogramowanego i wgranego przez oprogramowanie dedykowane do planowania misji fotogrametrycznych)
2. Opracowanie własnej ortofotomapy	tak
3. Nadanie prawidłowej georeferencji	
4. Edycja ortofotomapy, praca z fotopunktami i punktami kontrolnymi, edycja mozaikowania	
5. Eksport produktów przetwarzania do zewnętrznych programów	
6. Generowanie i opracowywanie mapy warstwicznej	

Źródło: <https://www.bzbuas.com/pl>

Do drona o konstrukcji płatownia podczepiono kamerę multispektralną firmy Micasense model Altum-PT (rys. 4).



Rys. 4. Kamera multispektralna wykorzystana w doświadczeniu

Źródło: <https://navigate.pl/produkt/micasense-altum-pt/>

Kamera wykorzystana do wykonywania zobrażeń dużych obszarów rolnych model Altum-PT marki Micasense to innowacyjny zestaw sensorów przeznaczonych dla rolnictwa precyzyjnego. Kamera ta pozwoliła na uzyskanie dokładnego odwzorowania cech morfologicznych roślin oraz temperatury powierzchni czynnej roślin. Kamera składa się z 7 sensorów – niebieskiego, zielonego, czerwonego, czerwonej krawędzi (red edge) bliskiej podczerwieni (near IR), kanału LWIR (obraz termalny Long-Wave Infrared) oraz kanału panchromatycznego. Kanał LWIR to wysokiej rozdzielczości sensor pozwalający ze znaczną dokładnością ocenić jędrność aparatu asymilacyjnego oraz zaopatrzenie siedliska w wodę. Pozwala również na ocenę rozkładu przestrzennego temperatury powierzchni czynnej w uprawach. Kanał panchromatyczny natomiast rejestruje całość promieniowania z zakresu widzialnego, co pozwala na wyostrażanie obrazów spektralnych (zwiększenie rozdzielczości). Zastosowanie w kamerze migawki globalnej sprawiło, że otrzymany obraz z wszystkich kanałów spektralnych jest wolny od zniekształceń, co pozwoliło na bezbłędne połączenie wszystkich pasm spektralnych w czytelną ortomozaikę. W tabeli 6 przedstawiono specyfikację techniczną zaawansowanego sensora Altum-PT. Jest to zintegrowana (hybrydowa) jednostka pomiarowa, która wyróżnia się jednoczesną akwizycją danych z trzech różnych typów sensorów: kamery multispektralnej (5 kanałów), kamery panchromatycznej (12 MP) oraz kalibrowanego radiometrycznie sensora termowizyjnego LWIR. Taka konfiguracja jest kluczowa dla zaawansowanej teledetekcji rolniczej. Pięć kanałów spektralnych (w tym kluczowe dla oceny kondycji roślin red edge

i near IR) o rozdzielczości 3.2 MP pozwala na precyzyjne obliczanie wskaźników vegetacyjnych. Jednoczesne pozyskiwanie danych z kanału termowizyjnego (LWIR) umożliwia ocenę stresu wodnego roślin i niedoborów wody w glebie (np. poprzez mapowanie temperatury łanu). Unikalną cechą tego modelu, kluczową dla badań, jest kanał panchromatyczny o bardzo wysokiej rozdzielczości (12 MP). Pozwala on na zastosowanie techniki pansharpeningu (wyostrzania), która łączy wysoką rozdzielczość przestrzenną obrazu panchromatycznego z informacją spektralną z pozostałych kanałów. Umożliwia to osiągnięcie wynikowej rozdzielczości terenowej (GSD) na poziomie zaledwie $2,49 \text{ cm} \cdot \text{px}^{-1}$ (przy locie na 120 m AGL), co jest wartością ponad dwukrotnie lepszą niż standardowe GSD kanałów spektralnych ($5,28 \text{ cm/piksel}$). Tak wysoka rozdzielczość pozwala na identyfikację bardzo małych obiektów, wczesnych objawów chorobowych czy precyzyjną analizę struktury łanu. Sensor charakteryzuje się również wysoką szybkością akwizycji ($2 \text{ klatki} \cdot \text{s}^{-1}$) z zapisem na szybkich nośnikach CFexpress oraz stopniem ochrony IP4X, co kwalifikuje go do profesjonalnych zastosowań w zmiennych warunkach polowych.

Tabela 6

Główne parametry techniczne kamery multispektralnej Altum-PT

Parametry techniczne	Altum-PT
Waga	577 g
Wymiary	$11,0 \times 8,0 \times 6,9 \text{ cm}$
Zasilanie	7,0 V–25,2 V
Moc	5,5/7,0/10 W (czuwanie, średnia, pik)
Kanały spektralne	niebieski (centrum kanału 475 nm, szerokość kanału 32 nm), zielony (centrum kanału 560 nm, szerokość kanału 27 nm), czerwony (centrum kanału 668 nm, szerokość kanału 14 nm), czerwona krawędź (centrum kanału 717 nm, szerokość kanału 12 nm), bliska podczerwień (centrum kanału 842 nm, szerokość kanału 57 nm)
Kanał termalny LWIR	FLIR LWIR termalny podczerwony 7,5–135 μm o kalibracji radiometrycznej
Rozdzielczość kanałów	2064×1544 (3.2 MP kanały spektralne), 4112×3008 (12 MP kanał panchromatyczny), 320×256 termalny podczerwony
Multispec GSD @120m (kanał spektralny)	$5,28 \text{ cm} \cdot \text{px}^{-1}$
Panchro & Pansharpened GSD @120m	$2,49 \text{ cm} \cdot \text{px}^{-1}$
Termalny GSD @120m	$33,5 \text{ cm} \cdot \text{px}^{-1}$

cd. tab. 6

Parametry techniczne	Altum-PT
Czas zapisu (wszystkie kanały, RAW, DNG format)	zapis 2 klatki na sekundę w formacie raw DNG
Pole widzenia	50° HFOV × 38° VFOV (MS), 46° HFOV × 35° VFOV (PAN), 48° × 40° (LWIR)
Pamięć	CFexpress Card
Odporność IP	IP4X
Interfejs	3 konfigurowalne piny GPIO (ang. <i>General Purpose Input/Output</i>): do wyboru wejście wyzwalające (trigger), wejście PPS, wyjście PPS oraz sygnały początku ramki (top of frame); wirtualny przycisk hosta. Port USB 2.0 do obsługi WiFi. Port szeregowy. Ethernet 10/100/1000; pamięć masowa na kartach CFexpress

Źródło: <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/4419868608407-Altum-PT-Integration-Guide>

Dobór aparatury badawczej został podyktowany koniecznością wdrożenia wieloskalowej strategii akwizycji danych umożliwiającej zarówno efektywne mapowanie rozległych obszarów rolnych (pola towarowe), jak i prowadzenie precyzyjnych, punktowych nalotów na wyznaczonych poletkach badawczych w mikroskali (mikropoletka).

Uzasadniając wybór bezzałogowych platform przyjęto system z wykorzystaniem dwóch platform, aby zoptymalizować przebieg doświadczeń. Wybór płatowca pionowego startu i lądowania (VTOL) był podyktowany wymogiem efektywności operacyjnej na dużych wysokościach mogących skanować duży obszar. Kluczowym parametrem był długi czas lotu wynoszący ponad 120 min przy zachowaniu ładowności 1400 g, co pozwalało na mapowanie setek hektarów gruntów ornych podczas jednego przelotu. Wysoka prędkość przelotowa wynosząca niemal 80 km·h⁻¹ oraz znacząca odporność na wiatr (w porywach do 14 m·s⁻¹) gwarantowały możliwość prowadzenia badań w realnych warunkach polowych. Zdolność do planowania misji na podstawie plików wektorowych z rozszerzeniem SHP oraz opcjonalna telemetria GSM czyniły z wykorzystanego płatowca podstawowe narzędzie do strategicznego monitoringu całych gospodarstw, w tym rolniczych zakładów doświadczalnych, których powierzchnie często wynosiły od 200 do nawet 1500 ha.

Wybór heksakoptera podyktowany był koniecznością posiadania platformy o wysokiej stabilności i dużym udźwigu, o ładowności wynoszącej ponad 5 kg. Chociaż czas lotu z ładunkiem był znacznie krótszy w porównaniu z płatowcem (16–18 minut), platforma ta była niezbędna do przenoszenia ciężkich, zaawansowanych sensorów wielospektralnych (jak Altum-PT). Jej zdolność do zawisu oraz wysuwane

podwozie umożliwiając prowadzenie elastycznych, niskopułapowych nalogów spektralnych, akwizycję danych z różnych kątów oraz inspekcję stref problematycznych wykrytych podczas nalogów strategicznych. Dobór sensorów spektralnych wykonano pod kątem zróżnicowania celów badawczych – od standardowej oceny wegetacji po zaawansowaną diagnostykę stresu suszy w roślinach. Sensor Altum-PT był wybrany jako kluczowy, hybrydowy sensor badawczy. Jego wybór uzasadniony był obecnością sensorów termowizyjnego (LWIR), panchromatycznego i RedEdge. Posiadanie kalibrowanego radiometrycznego kanału termalnego było niezbędne do naukowej oceny stresu wodnego, umożliwiając mapowanie temperatury łanu, co jest bezpośrednio powiązane z transpiracją i otwarciem aparatów szparkowych. Wykorzystanie sensora panchromatycznego umożliwiło zastosowanie techniki pansharpeningu, co skutkowało wysoką rozdzielczością przestrzenną (GSD) na poziomie ok. $2,5 \text{ cm} \cdot \text{px}^{-1}$ (z wysokości ok. 120 m AGL). Taka rozdzielczość była wymagana do wczesnej detekcji objawów chorobowych oraz precyzyjnej analizy morfologicznej nawet pojedynczych roślin. Wysoka rozdzielczość radiometryczna przesądziła o wyborze całej kamery. Sensor ten gwarantował pozyskanie danych o wysokiej czułości, niezbędnych do subtelnej analizy różnic w odbiciu spektralnym. Z kolei obecność sensora RedEdge-M jako standardowego sensora referencyjnego (workhorse) w projekcie była priorytetem. Jego wybór uzasadniony był niską masą oraz obecnością pięciu kluczowych z punktu widzenia badań rolniczych pasm spektralnych (w tym Red Edge i NIR). Kanały te były fundamentem dla kalkulacji podstawowych wskaźników wegetacyjnych (np. NDVI, NDRE) służących do oceny biomasy i zawartości chlorofilu. Niska waga i niewielkie rozmiary czyni go idealnym wyborem dla platformy płatowca EcoSKY 2.0, gdzie priorytetem była maksymalizacja czasu lotu i zmieszczenie aparatury pomiarowej we wnętrzu kadłuba statku powietrznego. Zastosowany system dwuplatformowy i dwusensorowy pozwolił na wdrożenie metodologii „zoom-in/zoom-out”. Platforma płatowca wyposażonego w lekki sensor służyła do szybkiej identyfikacji anomalii na dużym obszarze, natomiast platforma wielowirnikowa wyposażona w zaawansowany sensor hybrydowy była wykorzystywana do precyzyjnej, niskopułapowej diagnostyki zidentyfikowanych stref, dostarczając danych termalnych i obrazów o ultrawysokiej rozdzielczości do diagnostyki poziomu pojedynczej rośliny.

Dzięki zastosowaniu kamer spektralnych, możliwe było uzyskanie opracowań dotyczących:

- a) map pokrycia terenu przez rośliny,
- b) map zawartości barwników roślinnych,
- c) map stanu zdrowotnego i fazy rozwojowej roślin,
- d) map indeksów wegetacyjnych (NDVI, NDRE, MCARI, SAVI i in.),
- e) map rozkładu temperatury powierzchni czynnej,
- f) map wilgotności wierzchniej warstwy gleby,
- g) ortofotomozaiki.

Dzięki dostarczeniu wysokiej rozdzielczości danych spektralnych możliwe było obliczenie indeksów wegetacyjnych. Metoda ta pozwoliła na obrazowanie środowiska rolniczego – dotyczącego obliczania różnego rodzaju indeksów u roślin uprawnych oraz analizę uwilgotnienia gleby. Nowoczesna technologia obrazowań multispektralnych pozwoliła na uzyskanie analizy w bardzo krótkim czasie, dzięki uzyskaniu indeksu takiego jak NDVI (ang. *Normalized Difference Vegetation Index*), na podstawie którego możliwe było zaobserwowanie zmian zachodzących w uprawach rolnych. Ponadto z wysokości przelotowej bezzałogowego statku powietrznego możliwe było obserwowanie różnic w odżywieniu roślin wynikających ze zmienności gleb, monitorowanie stanu zdrowia roślin, określanie szkód wyrządzonych przez agrofagi, grzyby, straty łowickie itp.

Dokonano zobrazowania różnic stanu zdrowia roślin (wywołanych głównie niedoborem wody w środowisku glebowym) dzięki zestawieniu proporcji światła odbitego od roślin i przechwyconego w pasmach: czerwonym, zielonym, niebieskim oraz w bliskiej podczerwieni. Na podstawie odbicia światła rośliny dobrze zaopatrzone w składniki pokarmowe i wodę różniły się w stosunku do roślin niedostatecznie odżywionych lub chorych. Rośliny zdrowe, dobrze zaopatrzone w wodę i składniki odżywcze odbijały światło zielone oraz światło bliskiej podczerwieni (NIR, ang. *Near-infrared*) w większym stopniu niż rośliny słabiej odżywione czy chore.

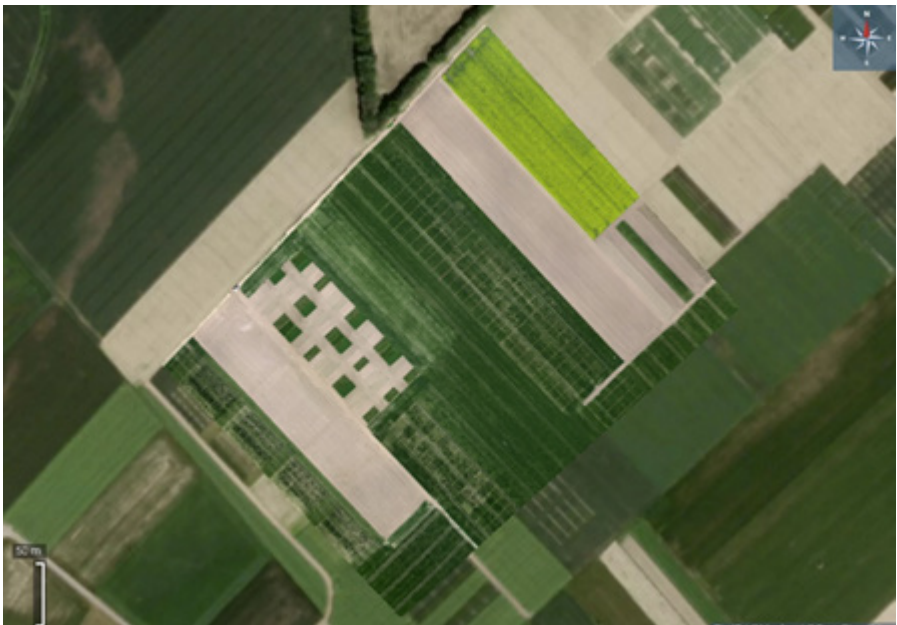
Ocena faz fenologicznych i ogólnej kondycji roślin z elementami uczenia maszynowego

Do oceny zdrowotności roślin wykorzystano wskaźnik NDVI pozyskany z niskopułapowych obrazowań środowiska rolniczego z wykorzystaniem pasm spektralnych.

Teledetekcja niskopułapowa pozwoliła m.in. na bardziej precyzyjne wyznaczenie zdrowotności roślin w obrębie danego pola bądź uprawy w porównaniu z metodami tradycyjnymi – kosztownymi, opartymi na pomiarach punktowych. Dzięki zastosowaniu odpowiedniej kombinacji charakterystyk spektralnych możliwe było obliczenie wybranych wskaźników, umożliwiając ilościową i jakościową analizę stanu roślinności, na podstawie których zaobserwowano zmiany zachodzące w uprawach.

Do walidacji oceny faz fenologicznych oraz ogólnej kondycji roślin wykorzystano zobrazowania pola w Rolniczym Zakładzie Doświadczalnym w Grabowie wykonane w trzech terminach: w kwietniu, maju oraz lipcu, ukazane na rysunkach 5–7. Zobrazowania w każdym z 3 terminów wykonano z wykorzystaniem 8 pasm spektralnych (parametry techniczne obrazowań umieszczono w tab. 7–9).

Zobrazowania zostały wykonane z wysokości 100 m AGL i połączone z ok. 20000 zdjęć w jedną ortofotomapę dla każdego z trzech terminów. Na podstawie ortofotomap zostały wygenerowane mapy refleksyjności.



Rys. 5. Ortofotomapa pól wykonana 29 kwietnia 2024 roku w RZD Grabów

Źródło: opracowanie własne

Tabela 7

Parametry techniczne wykonanego zobrazowania z dnia 29 kwietnia 2024 roku

Czas	29.04.2024; godz. 13:15
Pozycja (WGS84)	51,3488235; 21,6633996
Obszar	8,802 ha
Wielkość piksela	2,209 cm·px ⁻¹
Kanały spektralne	8 sztuk (niebieski, zielony, panchromatyczny, czerwony, czerwonej krawędzi, NIR, termalny IR, alfa)

Źródło: opracowanie własne



Rys. 6. Ortofotomapa pól wykonana 20 maja 2024 roku w RZD Grabów

Źródło: opracowanie własne

Tabela 8

Parametry techniczne wykonanego zobrazowania z dnia 20 maja 2024 roku

Czas	20.05.2024; godz. 11:01
Pozycja (WGS84)	51,3492206; 21,6647263
Obszar	13,067 ha
Wielkość piksela	2,244 cm·px ⁻¹
Kanały spektralne	8 sztuk (niebieski, zielony, panchromatyczny, czerwony, czerwonej krawędzi, NIR, termalny IR, alfa)

Źródło: opracowanie własne



Rys. 7. Ortofotomapa pól wykonana 11 lipca 2024 roku w RZD Grabów

Źródło: opracowanie własne

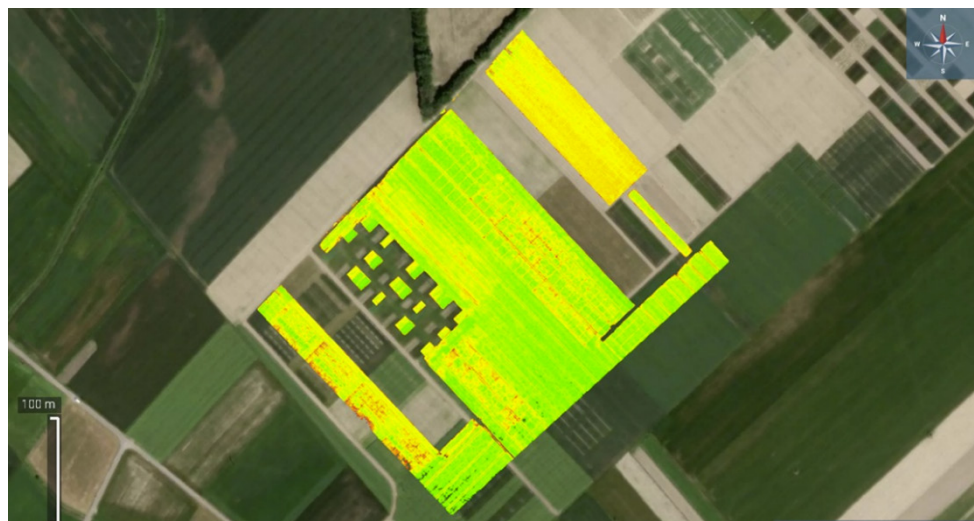
Tabela 9

Parametry techniczne wykonanego zobrazowania z dnia 11 lipca 2024 roku

Czas	11.07.2024; godz. 10:12
Pozycja (WGS84)	51,3488633; 21,6643870
Obszar	17,069 ha
Wielkość piksela	2,224 cm·px ⁻¹
Kanały spektralne	8 sztuk (niebieski, zielony, panchromatyczny, czerwony, czerwonej krawędzi, NIR, termalny IR, alfa)

Źródło: opracowanie własne

Pierwszym z walidowanych pól pod kątem ogólnej oceny kondycji roślin i określenia fazy fenologicznej było zobrazowanie pola pszenicy w formie ortofotomapy (rys. 8) o parametrach technicznych (tab. 7) wykonane w dniu 29 kwietnia.



Rys. 8. Obraz NDVI pól wykonany 29 kwietnia 2024 roku w RZD Grabów
Źródło: opracowanie własne

W celu określenia poszczególnych faz fenologicznych oraz oceny ogólnej kondycji roślin wykorzystano wyniki wskaźnika NDVI (tab. 10.). Podczas oceny pominięto pola przygotowane do uprawy (odkrytą glebę).

Tabela 10
Parametry techniczne wykonanego zobrazowania z dnia 29 kwietnia 2024 roku

Źródła warstwy

Pozyskanie	4/29/24 1:15:18 PM środkowoeuropejski czas letni
Środek	51,3488235; 21,6633996 (WGS84)
Powierzchnia	~8,787 ha
Piksel terenowy	2,209 cm·px ⁻¹
Kanał	1 (skala szarości)

Histogram i Legenda



Ustawienia wizualizacji

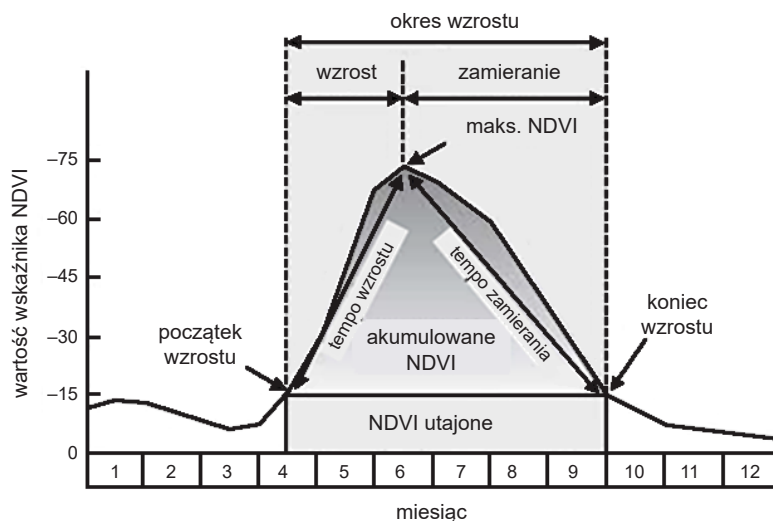
Wyrównanie histogramu:	wyłączone
Wybrana wartość minimalna:	0,423
Wybrana wartość maksymalna:	0,938
Wartość spoza zakresu:	przezroczyste

Statystyki

Powierzchnia warstwy:	8,787 ha
Średnia indeksu:	0,567
Odchylenie stand. indeksu (SD):	0,327
Średnia indeksu (widoczne):	0,789
Odchylenie stand. indeksu (widoczne):	0,118

Źródło: opracowanie własne

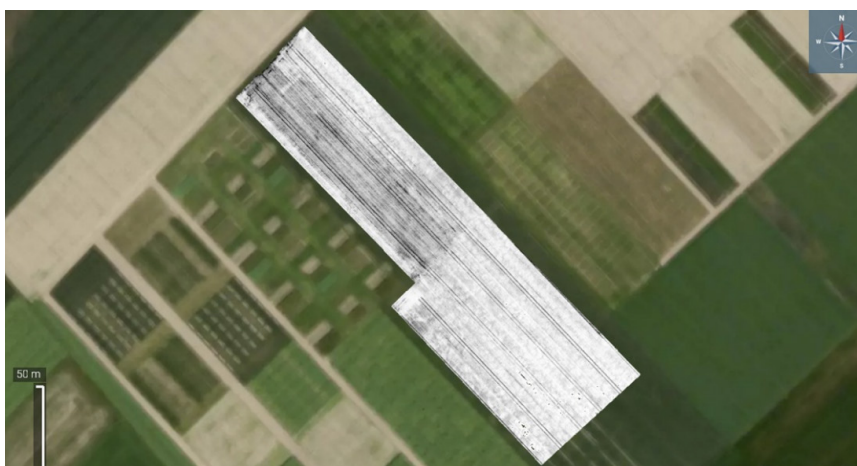
Dzięki zastosowaniu technik opartych na podstawie refleksyjności oraz klucza do określania poszczególnych faz fenologicznych, możliwe było określenie fazy fenologicznej danej uprawy (rys. 9).



Rys. 9. Histogram rozwoju faz fenologicznych upraw

Źródło: sat4envi.imgw.pl POLSA

Wyszczególniony obraz spektralny pola pszenicy dał możliwość zagłębienia się w struktury komórkowe roślin (rys. 10) i na podstawie odbicia spektralnego ukazanego w tabeli 11 określono fazę fenologiczną badanej uprawy.



Rys. 10. Obraz odbicia spektralnego wskaźnika NDVI kluczowego do określenia fazy fenologicznej

Źródło: opracowanie własne

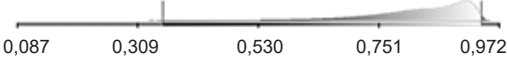
Tabela 11

Parametry techniczne wykonanego zobrazowania wskaźnika NDVI z dnia 29 kwietnia 2024 r.

Źródła warstwy

Pozyskanie	4/29/24 1:15:18 PM środkowoeuropejski czas letni
Środek	51,3486668; 21,6633029 (WGS84)
Powierzchnia	~1,598 ha
Piksel terenowy	2,209 cm·px ⁻¹
Kanał	1 (skala szarości)

Histogram i Legenda



Ustawienia wizualizacji

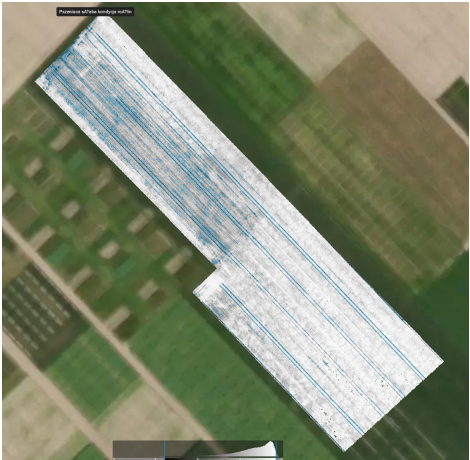
Wyrównanie histogramu:	wyłączone
Wybrana wartość minimalna:	0,355
Wybrana wartość maksymalna:	0,939
Wartość spoza zakresu:	przezroczyste

Statystyki

Powierzchnia warstwy:	1,598 ha
Średnia indeksu:	0,833
Odchylenie stand. indeksu (SD):	0,102
Średnia indeksu (widoczne):	0,834
Odchylenie stand. indeksu (widoczne):	0,095

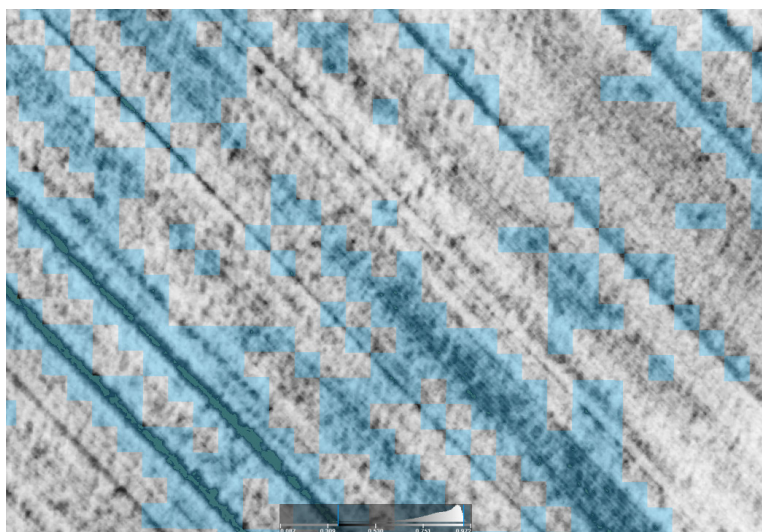
Źródło: opracowanie własne

Na podstawie klucza oraz po analizie wykonanych zobrazowań spektralnych określono fazę fenologiczną pszenicy na 30-32 w skali BBCH (ang. *Biologische Bundesanstalt Bundessortenamt und Chemische Industrie*). Następnie dokonano oceny ogólnej kondycji roślin, wykorzystując uczenie maszynowe. W tym celu na zobrazowanej mapie poligonu pszenicy (rys. 11) zaznaczono fragmenty pola, których średnie odbicie nie przekraczało 0,7 i mieściło się w zakresie 0–0,6 (rys. 12.), dzięki czemu uzyskano wynik roślin o dobrej i złej kondycji (rys. 13)



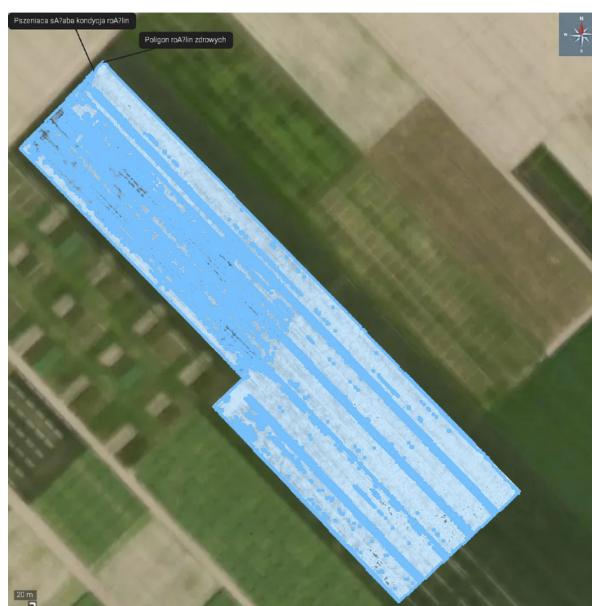
Rys. 11. Całe pole pszenicy z zaznaczonym niebieskim kolorem udziałem roślin o złej kondycji (wartości NDVI < 0,2)

Źródło: opracowanie własne



Rys. 12. Wybrany przybliżony fragment pola pszenicy z zaznaczonym niebieskim kolorem udziałem roślin o złej kondycji (wartości NDVI < 0,2)

Źródło: opracowanie własne



Rys. 13. Wynik udziału roślin pszenicy o złej oraz dobrej kondycji

Źródło: opracowanie własne

Dzięki zestawieniu obrazów pasm spektralnych wyznaczony został areal upraw o udziale roślin zdrowych oraz znacznie mniejszym udziale roślin o słabej i złej kondycji (tab. 12).

Tabela 12

Udział powierzchni z rozróżnieniem na rośliny zdrowe i o złej kondycji

Nazwa	Typ	Wielkość arealu (ha)	kolor
Udział roślin zdrowych	obszar	1,187	niebieski jasny
Udział roślin o złej kondycji	obszar	0,235	niebieski ciemny

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie specjalistycznego oprogramowania do oceny odbicia została wygenerowana mapa z podziałem na siedem stref (od bardzo dobrej do złej kondycji zdrowotnej roślin), na podstawie której, wygenerowano mapę dotyczącą potrzeb zasilenia roślin azotem (rys. 14). Można ją było zaimplementować do opryskiwaczy lub rozsiewaczy wyposażonych w instrumenty z możliwością zastosowania zmiennych parametrów nawożenia (odłączane sekcje dyszy opryskiwaczy, system rozsiewu granicznego czy przełączanie sekcji szerokości rozsiewania).

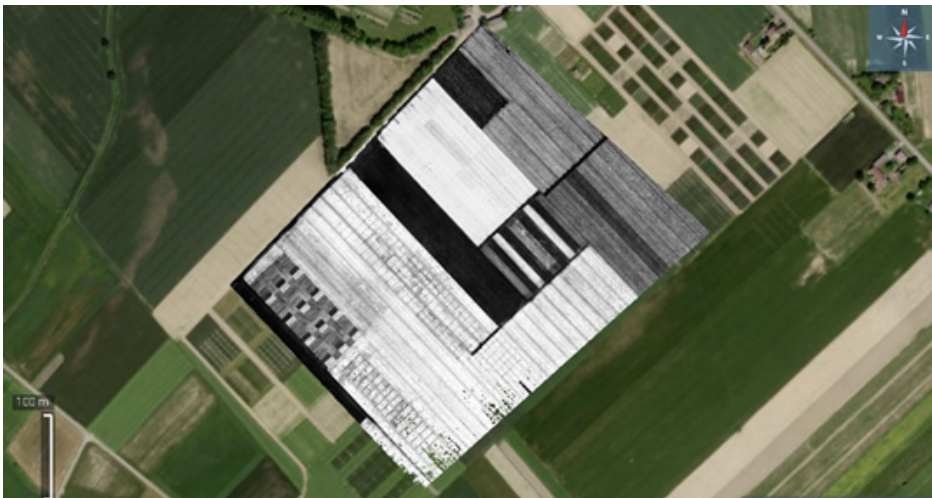


Rys. 14. Wygenerowana mapa pola pszenicy z rozróżnieniem siedmiu stref dotyczących potrzeb nawozowych

Źródło: opracowanie własne

Podobną ocenę wykonano dla zobrażeń sporządzonych w terminie majowym i lipcowym.

Kolejnym z walidowanych pól pod kątem oceny ogólnej kondycji roślin i określenia fazy fenologicznej było pole pszenicy, którego zobrazowanie zostało wykonane w dniu 20 maja (rys. 15).



Rys. 15. Obraz NDVI pól wykonany 20 maja 2024 roku w RZD Grabów

Źródło: opracowanie własne

W celu dokonania określenia poszczególnych faz fenologicznych oraz oceny ogólnej kondycji roślin wykorzystano wyniki wskaźnika NDVI (tab. 13).

Tabela 13

Parametry techniczne wykonanego zobrazowania z dnia 20 maja 2024 roku

Źródła warstwy		Histogram i Legenda	
Pozyskanie	5/20/24 11:01:03 AM środkowoeuropejski czas letni		
Środek	51,3492206; 21,6647263 (WGS84)	Ustawienia wizualizacji	
Powierzchnia	~13,047 ha	Wyrównanie histogramu:	wylączone
Piksel terenowy	2,244 cm·px ⁻¹	Wybrana wartość minimalna:	0,068
Kanał	1 (skala szarości)	Wybrana wartość maksymalna:	0,915
		Wartość spoza zakresu:	przezroczyste
		Statystyki	
		Powierzchnia warstwy:	13,047 ha
		Średnia indeksu:	0,593
		Odchylenie stand. indeksu (SD):	0,284
		Średnia indeksu (widoczne):	0,590
		Odchylenie stand. indeksu (widoczne):	0,280

Źródło: opracowanie własne

Wyszczególniony obraz spektralny pola pszenicy dał możliwość zagłębienia się w obraz refleksyjności (rys. 16) i na podstawie odbicia spektralnego ukazanego w tabeli 14 określono fazę fenologiczną badanej uprawy.



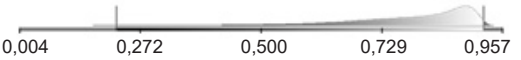
Rys. 16. Obraz odbicia spektralnego wskaźnika NDVI kluczowego do określenia fazy fenologicznej
Źródło: opracowanie własne

Tabela 14
Parametry techniczne wykonanego zobrazowania wskaźnika NDVI z dnia 20 maja 2024 r.

Źródła warstwy

Pozyskanie	5/20/24 11:01:03 AM środkowoeuropejski czas letni
Środek	51,3485631; 21,6633703 (WGS84)
Powierzchnia	~1,752 ha
Piksel terenowy	2,244 cm·px ⁻¹
Kanał	1 (skala szarości)

Histogram i Legenda



Ustawienia wizualizacji

Wyrównanie histogramu:	wyłączone
Wybrana wartość minimalna:	0,228
Wybrana wartość maksymalna:	0,921
Wartość spoza zakresu:	przezroczyste

Statystyki

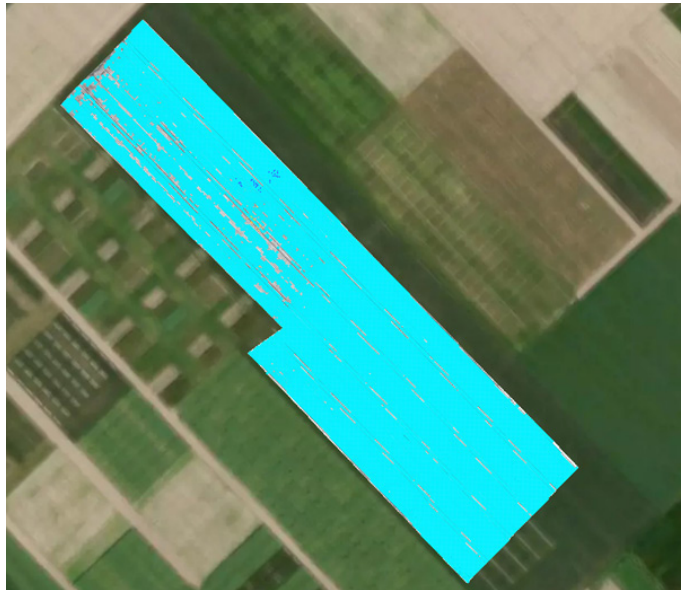
Powierzchnia warstwy:	1,752 ha
Średnia indeksu:	0,790
Odchylenie stand. indeksu (SD):	0,128
Średnia indeksu (widoczne):	0,791
Odchylenie stand. indeksu (widoczne):	0,124

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie klucza oraz po analizie wykonanych obrazowań spektralnych określono fazę fenologiczną pszenicy na 51-52 w skali BBCH (pobierano próbki odbicia spektralnego ze zróżnicowanych miejsc i na podstawie średniej refleksyjności stworzono klucz fotointerpretacyjny oraz określono fazę fenologiczną).

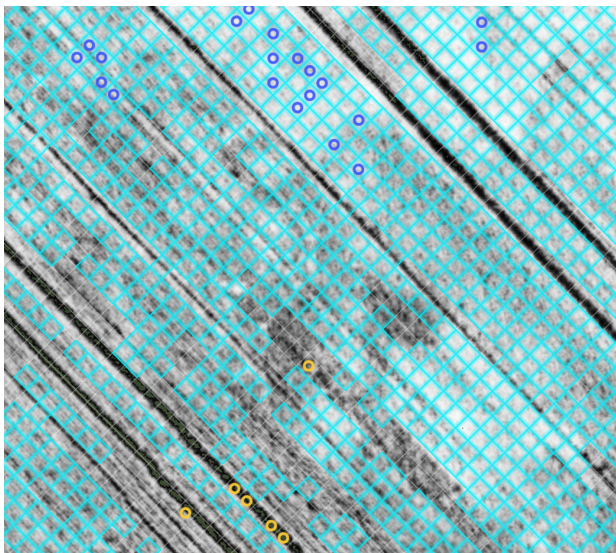
Następnie dokonano oceny ogólnej kondycji roślin, wykorzystując uczenie maszynowe.

W tym celu na obrazowanej mapie poligonu pszenicy (rys. 17) zaznaczono fragmenty upraw, których średnie odbicie nie przekraczało 0,7 i mieściło się w zakresie 0–0,6 (rys. 18.), dzięki czemu uzyskano mapę rozkładu przestrzennego roślin o dobrej i złej kondycji (rys. 19).



Rys. 17. Całe pole pszenicy z zaznaczonym niebieskim kolorem udziałem roślin o dobrej kondycji (wartości NDVI < 0,2)

Źródło: opracowanie własne



Rys. 18. Wybrany przybliżony fragment pola pszenicy z zaznaczonym niebieskim kolorem kwadratów udziałem roślin o dobrej kondycji (wartości NDVI $< 0,2$)

Źródło: opracowanie własne



Rys. 19. Wynik udziału roślin pszenicy o złej oraz dobrej kondycji

Źródło: opracowanie własne

Dzięki zestawieniu obrazów pasm spektralnych został wyznaczony areal upraw o udziale roślin zdrowych oraz znacznie mniejszym udziale roślin o słabej i złej kondycji (tab. 15).

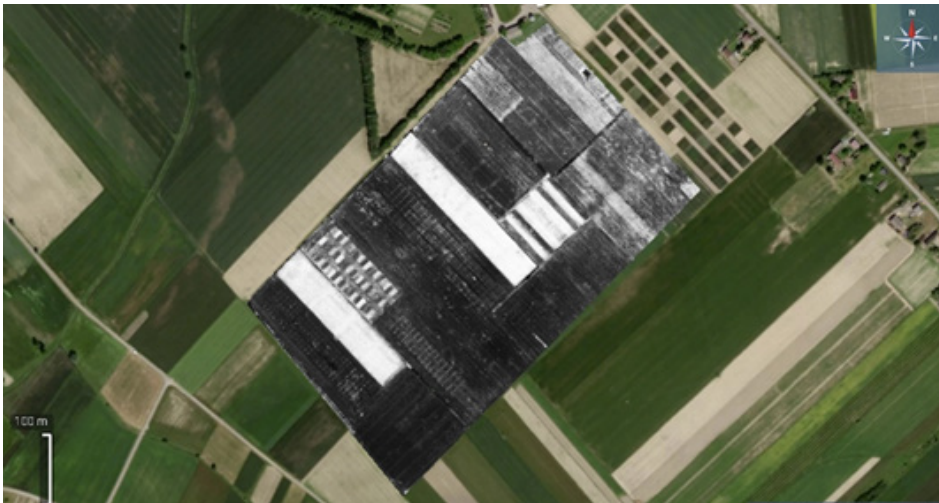
Tabela 15

Udział powierzchni z rozróżnieniem na rośliny zdrowe i o złej kondycji

Nazwa	Typ	Wielkość arealu w ha	Kolor
Udział roślin zdrowych	obszar	1,417	niebieski ciemny
Udział roślin o złej kondycji	obszar	0,335	niebieski jasny

Źródło: opracowanie własne

Ostatnią ocenę sporządzono dla zobrazowań wykonanych w terminie lipcowym. Trzecim z walidowanych pól pod kątem oceny ogólnej kondycji roślin i określenia fazy fenologicznej było pole pszenicy, którego zobrazowanie zostało wykonane w dniu 11 lipca (rys. 20).



Rys. 20. Obraz NDVI pól wykonany 11 lipca 2024 roku w RZD Grabów

Źródło: opracowanie własne

W celu określenia poszczególnych faz fenologicznych oraz dokonania oceny ogólnej kondycji roślin wykorzystano wyniki wskaźnika NDVI (tab. 16).

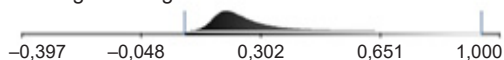
Tabela 16

Parametry techniczne wykonanego zobrazowania z dnia 11 lipca 2024 roku

Źródła warstwy

Pozyskanie	7/11/24 10:12:34 AM środkowoeuropejski czas letni
Środek	51,3488633; 21,6643870 (WGS84)
Powierzchnia	~17,046 ha
Piksel terenowy	2,224 cm·px ⁻¹
Kanał	1 (skala szarości)

Histogram i Legenda



Ustawienia wizualizacji

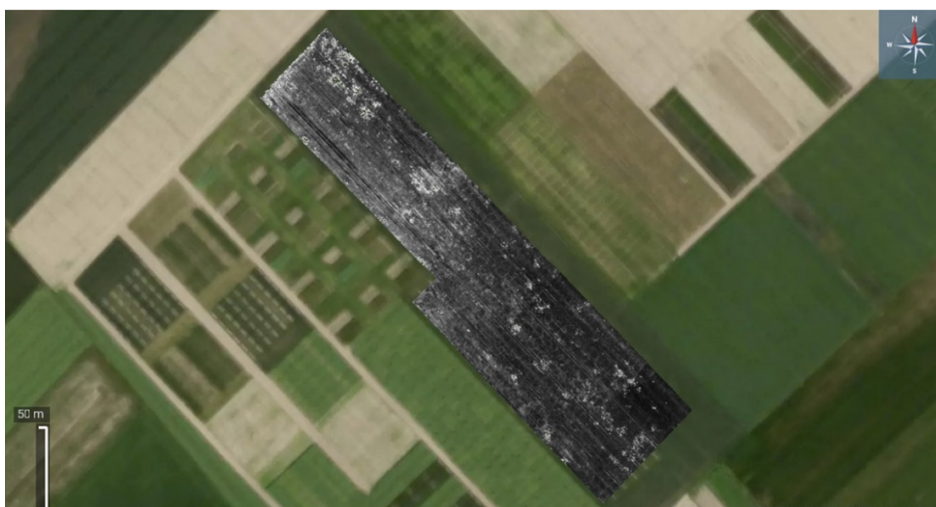
Wyrównanie histogramu:	wyłączone
Wybrana wartość minimalna:	0,080
Wybrana wartość maksymalna:	0,946
Wartość spoza zakresu:	przezroczyste

Statystyki

Powierzchnia warstwy:	17,046 ha
Średnia indeksu:	0,403
Odchylenie stand. indeksu (SD):	0,247
Średnia indeksu (widoczne):	0,402
Odchylenie stand. indeksu (widoczne):	0,244

Źródło: opracowanie własne

Uzyskano obraz spektralny pola pszenicy (rys. 21), na podstawie którego została dokonana ocena odbicia spektralnego ukazanego w tabeli 17, dzięki czemu określono fazę fenologiczną badanej uprawy.



Rys. 21. Obraz odbicia spektralnego wskaźnika NDVI kluczowego do określenia fazy fenologicznej

Źródło: opracowanie własne

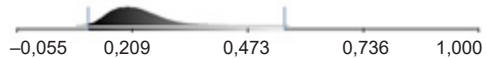
Tabela 17

Parametry techniczne wykonanego zobrazowania wskaźnika NDVI z dnia 11 lipca 2024 r.

Źródła warstwy

Pozyskanie	7/11/24 10:12:34 AM środkowoeuropejski czas letni
Środek	51,3485212; 21,6634486 (WGS84)
Powierzchnia	~1,777 ha
Piksel terenowy	2,224 cm·px ⁻¹
Kanał	1 (skala szarości)

Histogram i Legenda



Ustawienia wizualizacji

Wyrównanie histogramu:	wyłączone
Wybrana wartość minimalna:	0,109
Wybrana wartość maksymalna:	0,557
Wartość spoza zakresu:	przezroczyste

Statystyki

Powierzchnia warstwy:	1,777 ha
Średnia indeksu:	0,233
Odchylenie stand. indeksu (SD):	0,088
Średnia indeksu (widoczne):	0,229
Odchylenie stand. indeksu (widoczne):	0,073

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie klucza fotointerpretacyjnego oraz po analizie wykonanych zobrazowań spektralnych określono fazę fenologiczną pszenicy na 89-92 w skali BBCH (pobierano próbki odbicia spektralnego ze zróżnicowanych miejsc i na podstawie średniej z odbicia określono fazę fenologiczną).

W fazie BBCH 90 nie dokonywano ogólnej oceny kondycji roślin, ponieważ zasychały, a ich wilgotność wahała się w granicach 14–17%.

Po przeprowadzonej dogłębnej analizie uzyskanych danych można stwierdzić, że wyniki otrzymane poprzez wykonanie zobrazowań w różnych terminach tego samego obiektu uzyskane metodą teledetekcji multispektralnej w zdecydowanej większości dają możliwość swobodnej interpretacji w celu określenia fazy fenologicznej oraz oceny ogólnej kondycji roślin.

Ocena wystąpienia i oszacowania szkód wyrządzonych przez zwierzęta przy wykorzystaniu elementów uczenia maszynowego

Materiałem źródłowym do opracowania map były dane pozyskane z nalogów spektralnych uzyskane za pomocą kamery multispektralnej zamontowanej na bezzałogowym statku powietrznym. Celem badań było oszacowanie szkód wyrządzonych przez zwierzęta przy wykorzystaniu metod uczenia maszynowego. Na podstawie map spektralnych zidentyfikowano i porównano kondycję roślin uprawnych oraz tych uszkodzonych mechanicznie, uwzględniając procentowy udział zniszczeń. Badania

prorowadzone były w Rolniczym Zakładzie Doświadczalnym w Grabowie n. Wisłą na dużych polach produkcyjnych.

Na zobrazowaniu RGB (rys. 22) widoczne jest pole rzepaku z częściowo występującymi uszkodzeniami mechanicznymi.



Rys. 22. Pole rzepaku z częściowo występującymi uszkodzeniami mechanicznymi widocznymi na obrazie ortofotomapy

Źródło: opracowanie własne

W ramach badania przeprowadzono analizę pozyskanego zobrazowania z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania mającego na celu wykazać procentowy udział strat spowodowanych uszkodzeniem mechanicznym roślin rzepaku mogący przyczynić się do obniżenia plonu. W tym celu wskazano miejsca o zwiększonym udziale uszkodzonych roślin. W ramach badania przeprowadzono naukę maszynową, dzięki której nauczono maszynę rozpoznawać miejsca występowania uszkodzeń. Algorytm uczenia maszynowego po analizie danych wejściowych wprowadzonych pod nadzorem (klasyfikacja uczenia maszynowego pod nadzorem) dokonał obliczeń i wskazał wszystkie uszkodzenia na badanym poligonie według ortofotomapy (rys. 23) i uzupełnionym o uszkodzenia według indeksu MCARI (rys. 24) o parametrach technicznych zobrazowania (tab 18).



Rys. 23. Pole rzepaku z częściowo występującymi uszkodzeniami mechanicznymi wskazanymi przez uczenie maszynowe na obrazie RGB

Źródło: opracowanie własne



Rys. 24. Pole rzepaku z uzupełnieniem uszkodzeń sklasyfikowanych przez uczenie maszynowe na obrazie MCARI

Źródło: opracowanie własne

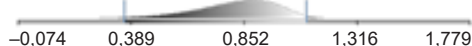
Tabela 18

Parametry techniczne zobrazowania MCARI

Źródła warstwy

Pozyskanie	5/20/24 11:01:03 AM środkowoeuropejski czas letni
Środek	51,3501337; 21,6645372 (WGS84)
Powierzchnia	~1,431 ha
Piksel terenowy	2,244 cm·px ⁻¹
Kanał	1 (skala szarości)

Histogram i Legenda



Ustawienia wizualizacji

Wyrównanie histogramu:	wyłączone
Wybrana wartość minimalna:	0,363
Wybrana wartość maksymalna:	1,108
Wartość spoza zakresu:	przezroczyste

Statystyki

Powierzchnia warstwy:	1,431 ha
Średnia indeksu:	0,864
Odchylenie stand. indeksu (SD):	0,158
Średnia indeksu (widoczne):	0,863
Odchylenie stand. indeksu (widoczne):	0,146

Źródło: opracowanie własne

Z przeprowadzonego doświadczenia wynika, że udział uszkodzeń mechanicznych na badanym polu wyrażony za pomocą kwadratów o specyficznym odbiciu spektralnym wyniósł ok. 1,46 % co znacząco nie wpłynęło na ogólny plon rzepaku. W tabeli 19 przedstawiono powierzchniowy udział uszkodzeń mechanicznych rzepaku wynoszący 209 m² z 14310 m².

Tabela 19

Udział uszkodzeń mechanicznych rzepaku na badanym poligonie

Nazwa	Typ	Wielkość areалу	Kolor
Uszkodzenia mechaniczne	obszar	209,880 m ²	niebieski jasny

Źródło: opracowanie własne

Uczenie maszynowe to dziedzina sztucznej inteligencji, która zrewolucjonizowała rozpoznawanie strat łowieckich na podstawie oznakowania charakterystycznych danych. Algorytm uczenia maszynowego (ML) został przetestowany na dużych zbiorach danych zawierających obrazy różnych rodzajów uszkodzeń roślin spowodowanych dziką zwierzyną, klasyfikując cechy tych uszkodzeń na typ uszkodzenia, stopień uszkodzenia oraz cechy charakterystyczne uszkodzenia dla danego gatunku zwierząt. Dzięki zastosowaniu tego typu rozwiązań możliwe będzie coraz dokładniejsze szacowanie strat łowieckich i ich klasyfikowanie bez konieczności analizy in-situ.

Ocena wystąpienia i oszacowania szkody spowodowanej chorobami roślin przy wykorzystaniu elementów uczenia maszynowego

Materiałem źródłowym do opracowania map były dane pozyskane z naltów spektralnych, uzyskane za pomocą kamery multispektralnej zamontowanej na bezzałogowym statku powietrznym. Celem prowadzonych badań dotyczących oceny wystąpienia i oszacowania szkody spowodowanej przez choroby roślin, uwzględniając czynnik procentowego udziału choroby na polu produkcyjnym (procentowy udział wystąpienia choroby) i bazując na elementach uczenia maszynowego, było porównanie kondycji roślin uprawnych obejmujących czynnik chorobowy. Do badań wykorzystano mapy obrazowań spektralnych uzyskanych z naltów spektralnych. Badania prowadzone były w Rolniczym Zakładzie Doświadczalnym w Grabowie n. Wisłą na dużych polach produkcyjnych.

Na obrazowaniu RGB przedstawionym na rysunku 25, o parametrach obrazowania ukazanych w tabeli 20, widoczne jest pole pszenicy gotowej do zbioru z częściowo występującym zachwaszczeniem (przebiegający się kolor zielony).



Rys. 25. Obraz RGB pola pszenicy ozimej do zbioru wykonany w lipcu 2024 roku w RZD Grabów
Źródło: opracowanie własne

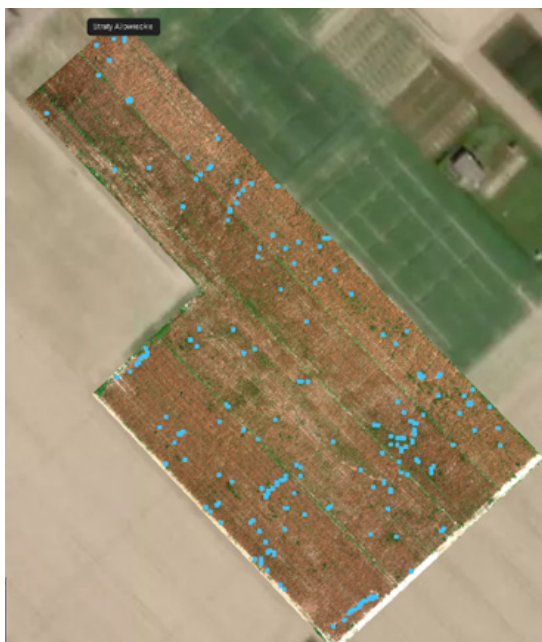
Tabela 20

Parametry wykonanego zobrazowania

Czas	7,11.2024; godz. 10:12
Pozycja (WGS84)	51,3506020; 21,6656451
Obszar	1,041 ha
Wielkość piksela	2,224 cm·px ⁻¹
Kanały spektralne	8 sztuk (niebieski, zielony, panchromatyczny, czerwony, czerwonej krawędzi, NIR, termalny IR, alfa)

Źródło: opracowanie własne

W ramach działania przeprowadzono doświadczenie z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania mającego na celu wykazanie procentowego udziału ziarniaków porażonych fuzariozą kłosów mogącą przyczynić się do obniżenia jakości ziarna (zmniejszenie zawartości białka i glutenu) oraz wskazanie miejsca o zwiększonym udziale porażenia fuzariozą kłosów. W ramach badania przeprowadzono naukę maszynową, dzięki której nauczono maszynę rozpoznawać miejsca występowania fuzariozy. Maszyna dokonała obliczeń i wskazała wszystkie siedliska na badanym poligonie (rys. 26).



Rys. 26. Obraz RGB pola pszenicy ozimej do zbioru wykonany w lipcu 2024 roku w RZD Grabów
Źródło: opracowanie własne

Z przeprowadzonego doświadczenia wynika, że udział fuzariozy na badanym polu wyrażony za pomocą roślin o specyficznym odbiciu spektralnym wyniósł ok. 0,68%, co nie wpłynęło znacząco na ogólną jakość zebranego ziarna. W tabeli 21 przedstawiono powierzchniowy udział porażonego ziarna wynoszący 71 m² z 10410 m².

Tabela 21

Parametry dotyczące udziału porażenia fuzariozą

Nazwa	Typ	Wielkość areалу	Kolor	
Porażenie fuzariozą	obszar	71,280 m ²	niebieski jasny	

Źródło: opracowanie własne

Przeprowadzone doświadczenie wykazało, że zestawienie pasm czerwonego (o długości fali 690–740 nm) i bliskiej podczerwieni (o długości fali 740–1000 nm) daje możliwość identyfikacji różnicy w odbiciu w celu odróżnienia pszenicy porażonej fuzariozą kłosów od części zdrowych roślin.

W niniejszych badaniach wykazano, że analiza szeregów czasowych map wskaźnika NDVI, wygenerowanych z danych multispektralnych, pozwala na skuteczne śledzenie rozwoju pszenicy ozimej i określenie jej kluczowych faz fenologicznych w skali BBCH. Obserwowana dynamika zmian wartości NDVI – od niższych wskaźników we wczesnych fazach rozwoju, przez maksimum w okresie pełni wegetacji, po spadek w fazie dojrzewania – jest zgodna z ogólnym modelem rozwoju upraw zbożowych opisywanym w literaturze światowej (Aasen i in. 2018). Badania potwierdzają, że wskaźniki wegetacyjne, takie jak NDVI, są czułe na zmiany w aktywności fotosyntetycznej i biomase roślin, co pozwala na monitorowanie ich rozwoju fenologicznego (Elsayed i in. 2018, Aierken i in. 2024). Zastosowanie platform bezzałogowych (UAV) pozwoliło na uzyskanie danych o bardzo wysokiej rozdzielczości przestrzennej (do wielkości piksela wynoszącego kilka centymetrów kwadratowych), co stanowi znaczącą przewagę nad obrazowaniami satelitarnymi, których rozdzielczość jest często zbyt niska do precyzyjnej oceny niewielkich pól letek doświadczalnych lub wczesnego wykrywania ognisk chorobowych (Mahlein i in. 2016). Możliwość elastycznego planowania misji i pozyskiwania danych w kluczowych momentach wzrostu, niezależnie od cykli satelitarnych, dodatkowo podnosi wartość tej technologii. Precyzyjne określenie fazy rozwojowej rośliny jest kluczowe dla terminowego stosowania nawozów czy środków ochrony roślin, a wyniki te potwierdzają, że teledetekcja niskopułapowa jest efektywnym, nieniszczącym narzędziem wspierającym takie decyzje (Chivasa i in. 2020). Tradycyjne metody oceny kondycji upraw na podstawie danych teledetekcyjnych często opierają się na arbitralnym progowaniu wartości wskaźników wegetacyjnych. W niniejszej pracy

zastosowano podejście oparte na uczeniu maszynowym (klasyfikacja pod nadzorem) do rozróżnienia stref o dobrej i złej kondycji oraz do identyfikacji uszkodzeń mechanicznych i porażenia przez choroby. Takie podejście pozwala na bardziej obiektywną i powtarzalną analizę. Liczne badania potwierdzają, że algorytmy ML, takie jak Random Forest (identyfikowany jako najpopularniejszy) czy sztuczne sieci neuronowe, są wysoce skuteczne w analizie danych multispektralnych z UAV do przewidywania kluczowych cech fenotypowych, takich jak biomasa czy zawartość azotu. Integracja UAV z zaawansowanymi modelami uczenia maszynowego umożliwia wczesną detekcję problemów na polu, często na wiele dni przed pojawieniem się widocznych symptomów, co pozwala na celowane interwencje oraz redukcję zużycia pestycydów i nawozów (Manfreda i in. 2018, Weiss i in. 2020, Sankey i in. 2021). Zastosowanie algorytmu, który po wstępnym nauczaniu przez człowieka na wskazanych przez operatora próbkach sam dokonuje klasyfikacji całego poligonu, znacząco przyspiesza proces analizy i otwiera drogę do automatyzacji oceny stanu zdrowotnego wielkoobszarowych upraw. Kluczowym wynikiem pracy jest ilościowe oszacowanie strat. Wykazano, że szkody wyrządzone przez zwierzęta na polu rzepaku wyniosły 1,46%, natomiast areał pszenicy porażonej fuzariozą kłosów oszacowano na 0,68%. Dane te mają ogromne znaczenie praktyczne, stanowiąc obiektywny materiał dowodowy, np. w procedurach odszkodowawczych. W literaturze podkreśla się, że tradycyjne metody szacowania strat łowieckich są często subiektywne i czasochłonne. Zastosowanie UAV i analizy obrazu (np. poprzez analizę wysokości upraw z cyfrowych modeli powierzchni lub klasyfikację obrazów RGB) pozwala na szybkie i precyzyjne mapowanie całego dotkniętego obszaru z dokładnością sięgającą nawet 99%. Podobnie w przypadku chorób, wczesna detekcja ognisk porażenia, jak w przypadku fuzariozy, jest kluczowa dla ograniczenia rozprzestrzeniania się patogenu. Wykorzystanie w badaniach pasm w zakresie czerwieni i bliskiej podczerwieni do identyfikacji różnic w odbiciu spektralnym między zdrową a chorą tkanką jest podejściem szeroko opisywanym jako skuteczne. Badania wskazują, że analiza spektralna, często łączona z analizą tekstury obrazu, pozwala na wykrywanie fuzariozy kłosów z wysoką dokładnością. Na krzywą odbicia spektralnego, a co za tym idzie na wyniki analizy, wpływ ma wiele czynników zewnętrznych, takich jak: warunki oświetleniowe, stan atmosfery, wilgotność czy wiek i ułożenie liści. Jest to jedno z największych wyzwań w teledetekcji, a brak standaryzowanego przepływu pracy jest jedną z głównych barier w szerszym komercyjnym zastosowaniu UAV w rolnictwie. Dlatego tak istotne jest rygorystyczne przestrzeganie procedur metodycznych, które w niniejszej pracy zostały zaimplementowane. Wykonanie kalibracji radiometrycznej przy użyciu płytki o znanej refleksyjności przed i po locie jest absolutnym standardem pozwalającym na normalizację danych i ich porównywalność w czasie. Podobnie zastosowanie naziemnych punktów kontrolnych (fotopunktów) i zaawansowanych procesów fotogrametrycznych, jak aerotriangulacja, gwarantuje wysoką dokładność geometryczną finalnych produktów,

takich jak ortofotomapa. Świadomość tych czynników i stosowanie odpowiednich środków zaradczych odróżnia pomiary amatorskie od wiarygodnych danych o charakterze naukowym (Zhang i in. 2018 i 2022).

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Teledetekcja niskopułapowa, oparta na danych z kamer multispektralnych, jest precyzyjnym i skutecznym narzędziem do monitorowania dynamiki rozwoju upraw w czasie rzeczywistym, co udowodniono poprzez poprawne określenie faz fenologicznych pszenicy ozimej w skali BBCH w trzech kluczowych terminach wegetacji.
2. Algorytmy uczenia maszynowego w trybie klasyfikacji pod nadzorem stanowią obiektywną i powtarzalną metodę analizy danych spektralnych, umożliwiając automatyczną identyfikację i ilościowe określenie obszarów upraw o zróżnicowanej kondycji zdrowotnej.
3. Zaproponowana metodyka pozwala na precyzyjne oszacowanie strat w uprawach, co wykazano na przykładzie szkód wyrządzonych przez zwierzęta w rzepaku (oszacowane na 1,46% powierzchni) oraz porażenia pszenicy przez fuzariozę kłosów (oszacowane na 0,68% powierzchni).
4. Dane o zróżnicowaniu kondycji roślin w obrębie pola mogą być bezpośrednio wykorzystane do generowania map aplikacyjnych, wspierając wdrażanie technologii zmiennego dawkowania (VRA) nawozów lub środków ochrony roślin, co jest fundamentem rolnictwa 4.0.
5. Wiarygodność i powtarzalność wyników uzyskanych metodami teledetekcyjnymi jest ściśle uzależniona od rygorystycznego przestrzegania procedur fotogrametrycznych i radiometrycznych, w tym planowania misji, zakładania osnowy oraz kalibracji sensorów.

Literatura

1. Aasen H., Honkavaara E., Lucieer A., Zarco-Tejada P.J.: Quantitative Remote Sensing at Ultra-High Resolution with UAV Spectroscopy: A Review of Sensor Technology, Measurement Procedures, and Data Correction Workflows. *Remote Sensing*, 2018, **10**(7), 1091; DOI: 10.3390/rs10071091
2. Aierken N., Yang B., Li Y., Jiang P., Pan G., Li S.: A review of unmanned aerial vehicle based remote sensing and machine learning for cotton crop growth monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, **227**(2): 109601; <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109601>
3. Chivasa W., Mutanga O., Biradar C.: UAV-based multispectral phenotyping for disease resistance to accelerate crop improvement under changing climate conditions. *Remote Sensing*, 2020, **12**(15), 2445; <https://doi.org/10.3390/rs12152445>
4. Elsayed K.M.F., Ismail T., Ouf N.S.: A review on the relevant application of machine learning in agriculture. *IJ IREEICE*, 2018, **6**(8): 1-17; DOI: 10.17148/IJIREICE.2018.681

5. Mahlein A.K.: Plant disease detection by imaging sensors—parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. *Plant Disease*, 2016, **100**(2): 241-251; DOI: 10.1094/PDIS-03-15-0340-FE
6. Manfreda S., McCabe M.F., Miller P.E., Lucas R. et al.: On the use of unmanned aerial systems for environmental monitoring. *Preprints.org*, 2018; DOI: 10.20944/preprints201803.0097.v1
7. Sankey T., Sankey T.T., Li J., Ravi S. Wang G., Caster J., Kasprak A.: Quantifying plant soil-nutrient dynamics in rangelands: Fusion of UAV hyperspectral-LiDAR, UAV multispectral-photogrammetry and ground-based LiDAR-digital photography in a shrub-encroached desert grassland. *Remote Sensing of Environment*, 2021, **253** (e1701284), 112223; <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112223>
8. Weiss M., Jacob F., Duveiller G.: Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sensing of Environment*, 2020, **236**(5), 111402; DOI: 10.1016/j.rse.2019.111402
9. Zhang H., Huang L., Huang W., Dong Y., Weng S., Zhao J., Ma H., Liu L.: Detection of wheat *Fusarium* head blight using UAV-based spectral and image feature fusion. *Frontiers in Plant Science*, 2022, **13**, 1004427; DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1004427>
10. Zheng H., Cheng T., Li D., Yao X.: Combining unmanned aerial vehicle (UAV)-based multispectral imagery and ground based hyperspectral data for plant nitrogen concentration estimation in rice. *Frontiers in Plant Science*, 2018, **9**, 936; DOI: 10.3389/fpls.2018.00936

Adres do korespondencji:

mgr inż. Tytus Berbeć
Zakład Biogospodarki i Agrometeorologii
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Pulawy
tel. 81 47 86 758
e-mail: tberbec@iung.pulawy.pl

AUTOR
Tytus Berbeć

ORCID
0000-0001-5183-5807