

**KONCEPCJA QUASI-OBIEKTOWEJ METODY ANALIZY
WIELOSPEKTRALNYCH ZDJĘĆ LOTNICZYCH
I JEJ ZASTOSOWANIA DO ANALIZY
SKŁADU GATUNKOWEGO DRZEWOSTANÓW**

**AN OUTLINE OF A QUASI-OBJECT-BASED ANALYSIS
OF MULTISPECTRAL AERIAL IMAGES AND ITS USE
TO DETERMINE SPECIES COMPOSITION
OF FOREST STANDS**

Krzysztof Będkowski, Krzysztof Stereńczak

Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, Wydział Leśny
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Słowa kluczowe: leśnictwo, bezzałogowy statek latający (BSL), klasyfikacja quasi-objektowa, niemetryczne zdjęcia lotnicze

Keywords: forestry, unmanned aerial vehicle (UAV), quasi object-based classification, non-metric aerial images

Wstęp

Rozpoznanie obiektów na podstawie ich obrazów jest podstawowym zadaniem teledetekcji. Jednym z etapów rozpoznania jest wspomagany metodami cyfrowymi proces klasyfikacji treści obrazów, który współcześnie realizowany jest za pomocą algorytmów klasyfikacji wielospektralnej lub obiektowej. W klasyfikacji wielospektralnej analizowanymi obiektami są pojedyncze piksele obrazu. Ich przynależność do danej klasy wynika z wartości jasności piksela w poszczególnych kanałach spektralnych obrazu. Nie ma znaczenia, z jakimi pikselami sąsiaduje dany piksel. Klasyfikacja wielospektralna (pikselowa) może być realizowana za pomocą procedur klasyfikacji nadzorowanej lub nienadzorowanej. Pierwsze z nich wymagają wstępnego wyboru obiektów wzorcowych, na podstawie których zostaną wyliczone charakterystyki spektralne dla każdej z wyróżnianych klas obiektów. Wymagana jest zatem wiedza *a priori* o treści analizowanych obrazów. W wariacie klasyfikacji nienadzorowanej algorytm poszukuje pikseli podobnych pod względem wartości jasności i grupuje je (tworzy skupienia). Zadaniem operatora jest nadanie znaczenia wyróżnionym grupom pikseli. Rozwijana od kilkunastu lat metoda klasyfikacji obiektowej opiera się na analizie jasności pikseli

oraz ich wzajemnego przestrzennego układu (Definiens, 2004). Wyróżniane są na tej podstawie segmenty obrazu. Wielkość wyznaczanych segmentów jest jednym z parametrów metody. Na obszarach lasów segmentem może być drzewostan, jeśli w wystarczającym stopniu odróżnia się od otaczających go drzewostanów, grupy drzew, pojedyncze drzewa lub nawet fragmenty koron. Jak wynika z doświadczeń, podział koron drzew na mniejsze jednostki powodowany jest niejednakowym (kierunkowym) oświetleniem – w każdej koronie są partie jasne, pozostające w cieniu własnym lub w cieniu rzucanym przez inne drzewa. Zmienność oświetlenia koron jest czynnikiem bardzo utrudniającym zastosowanie w leśnictwie metod cyfrowego przetwarzania obrazów o dużej rozdzielczości.

Zdjęcia lotnicze wykonywane w różnych zakresach spektralnych są wykorzystywane w leśnictwie między innymi do oceny stanu zdrowotnego lub składu gatunkowego drzewostanów. Klasyfikacja treści obrazów opiera się na wizualnej lub cyfrowej analizie widocznych na zdjęciach barw koron drzew.

Teledetekcja lasów zyskała ostatnio nowe możliwości wykonywania obrazów poprzez zastosowanie bezzałogowych statków latających (BSL). Podstawową ich zaletą jest możliwość wykonania obrazów w warunkach i na warunkach, jakich nie mogą spełnić klasyczne lotnicze systemy fotogrametryczne. Zdjęcia z BSL mogą być wykonane w bardzo krótkim czasie od zamówienia, z niskiej wysokości, przy trudnych warunkach oświetlenia (np. pod chmurami) i dotyczyć niedużego obszaru (aspekt ekonomiczny). Szczególnie ważna, jak wynika z naszych dotychczasowych analiz, jest możliwość wykonywania zdjęć bezcieniowych, na których korony drzew są oświetlone równomiernie. Obrazy z BSL są składane do postaci ortomozaik, a więc obrazów, z których usunięte są zniekształcenia wynikające z nachylenia zdjęć, ukształtowania terenu i zróżnicowania wysokościowego odwzorowanych obiektów. Proces składania zdjęć wykorzystuje metody korelacji obrazów i jest w pełni zautomatyzowany.

Koncepcja metody klasyfikacji

W niniejszym artykule autorzy przedstawiają koncepcję metody klasyfikacji treści zdjęć wielospektralnych, która może być zastosowana do analizy składu gatunkowego drzewostanów. Metoda w założeniach podobna jest do rozwiązania zastosowanego wcześniej przez autorów do analizy struktury drzewostanów na podstawie wartości modeli terenu (Stereńczak, Będkowski, 2011). Obiektami podlegającymi klasyfikacji są poszczególne drzewa, a nie piksele obrazu. Metoda, łącząca w sobie cechy klasyfikacji wielospektralnej i obiektowej, składa się z następujących etapów:

- 1) wykonanie wielospektralnych zdjęć lotniczych,
- 2) segmentacja obrazu w celu identyfikacji koron drzew i wskazania ich zasięgów (obrysów),
- 3) wybór drzew reprezentujących poszczególne gatunki,
- 4) obliczenie charakterystyk opisujących jasność obrazów koron drzew poszczególnych gatunków,
- 5) obliczenie charakterystyk opisujących jasność obrazów poszczególnych koron drzew,
- 6) klasyfikacja koron drzew (wskazanie przynależności do gatunku),
- 7) ustalenie składu gatunkowego.

Przedstawiony tok postępowania pozwoli na wyeliminowanie z procesu klasyfikacji tych części obrazu, które nie dotyczą koron drzew. Ponadto, ponieważ klasyfikowane są całe korony, można uniknąć sytuacji niejednoznacznych, występujących w pikselowej klasyfika-

cji wielospektralnej, gdy po zakończeniu klasyfikacji w obrębie korony danego drzewa znajdują się piksele zaliczone do różnych gatunków. Jest to efekt przestrzennego zróżnicowania koron drzew, gdzie, w zależności od wielkości piksela, na jego powierzchni znajdują się partie koron o różnym uigleniu/ulistnieniu i różnie oświetlone. Im piksele są mniejsze tym zmienność wartości charakterystyk spektralnych reprezentowanych przez nie fragmentów powierzchni koron jest większa.

Ważnym etapem metody jest segmentacja obrazu, która może być wykonana na podstawie danych obrazowych, skanowania laserowego lub poprzez kombinację różnych zbiorów danych w sposób manualny lub automatyczny. Na etapie opracowywania koncepcji metody, dokonano segmentacji manualnej, poprzez digitalizację ekranową obrysów koron drzew.

Jak w każdej metodzie klasyfikacji nadzorowanej, niezbędne jest wskazanie obiektów (tutaj drzew) typowych dla poszczególnych gatunków. Są to tzw. pola wzorcowe lub treninowe, na podstawie których wyliczane są charakterystyki opisujące jasność obrazu poszczególnych gatunków drzew, we wszystkich kanałach obrazu wielospektralnego. Sama klasyfikacja koron drzew może być zrealizowana za pomocą znanych algorytmów, na przykład najmniejszej odległości lub największego prawdopodobieństwa.

Ustalenie składu gatunkowego polega na obliczeniu powierzchni rzutów koron drzew sklasyfikowanych do poszczególnych gatunków.

Materiały i metodyka

W pracy autorzy wykorzystali ortomozaiki (rys. 1) utworzone ze zdjęć drzewostanów uroczyska Głuchów w Leśnym Zakładzie Doświadczalnym SGGW, wykonanych za pomocą cyfrowych kamer niemetrycznych Sigma DP2, które rejestrowały obrazy w czterech zakresach spektralnych: niebieskim, zielonym, czerwonym oraz podczerwonym. Możliwość rejestracji podczerwieni uzyskano poprzez ingerencję w konstrukcję jednego z aparatów – usunięcie fabrycznie zainstalowanego filtra podczerwieni (Zmarz, 2011). Platformą przenoszącą kamery był bezzałogowy statek latający AVI-1 firmy Taxus SI z Warszawy (Taxus, 2010; Zmarz, 2011), zaprojektowany specjalnie do wykonywania lotów fotogrametrycznych. Zdjęcia wykonano w październiku, czyli w końcowej fazie sezonu wegetacyjnego, kiedy widoczne są duże zmiany w barwach aparatu asymilacyjnego drzew. W momencie nalotu chmury były stosunkowo nisko, przez co brak było bezpośredniego oświetlenia słonecznego i otrzymano zdjęcia były mało kontrastowe, czyli o małych różnicach tonalnych między oświetlonymi i zacienionymi częściami koron drzew.

Przydatność zdjęć uzyskanych za pomocą opisanego systemu BSL potwierdzono doświadczalnie. Zmarz i in. (2012) badali za ich pomocą stan zdrowotny drzewostanu świerka pospolitego (*Picea abies* (Karst.) L.). Będkowski i Stereńczak (2012) podjęli natomiast próbę odróżniania na zdjęciach obcego dla naszych lasów gatunku, jakim jest dąb czerwony (*Quercus rubra* L.).

Na wydrukach zdjęć zlokalizowano poszczególne egzemplarze drzew, a następnie odnaleziono je w terenie i sprawdzono przynależność gatunkową. Kolejnym etapem była digitalizacja na ortomozaikach zasięgów koron drzew zidentyfikowanych w terenie.

W niniejszej pracy skoncentrowano się wyłącznie na etapie doboru obiektów wzorcowych dla klasyfikacji nadzorowanej. Wskazane poprzez digitalizację zasięgi koron drzew potraktowano jak obiekty wzorcowe procedury klasyfikacji nadzorowanej. Na ich podsta-

wie, za pomocą stosowanych w teledetekcji cyfrowej wskaźników separowalności: wskaźnika rozbieżności (*Divergence*), transformowanego wskaźnika rozbieżności (*Transformed divergence*) oraz odległości Bhattacharyya – (*Bhattacharyya distance*), a także testów statystycznych, oceniono możliwość odróżnienia od siebie poszczególnych klas obiektów, którymi były cztery gatunki drzew występujących w drzewostanach objętych nalotem (tab. 1). Ponieważ zdjęcia były wykonane w październiku, wyraźnie widoczne są na nich przebarwienia koron dębu bezszypułkowego, co pozwoliło na wyodrębnienie dodatkowo trzech faz fenologicznych tego gatunku.

Tabela 1. Gatunki i ich fazy fenologiczne uwzględnione w doświadczeniu

Gatunek	Skrót	Liczba drzew
Dąb bezszypułkowy – <i>Quercus petraea</i> (Mattuschka) Liebl.	liście zielone	Dbbs(z) 21
	liście żółte	Dbbs(ż) 22
	liście brązowe	Dbbs(b) 39
Dąb czerwony – <i>Quercus rubra</i> L.	Dbcz	17
Brzoza brodawkowata – <i>Betula verrucosa</i> L.	Brz	8
Sosna zwyczajna – <i>Pinus sylvestris</i> L.	So	120

Tabela 2. Wskaźniki separowalności gatunków (na podstawie wartości w pikselach) – podano wartości względne wskaźników

Wskaźnik rozbieżności – <i>Divergence</i> (średnia: 0,33)					
	Dbbs(z)	Dbbs(ż)	Dbbs(b)	Dbcz	Brz
Dbbs(ż)	0,07				
Dbbs(b)	0,10	0,03			
Dbcz	0,20	0,09	0,02		
Brz	0,12	0,05	0,04	0,09	
So	0,47	0,98	0,79	1	0,84
Transformowany wskaźnik rozbieżności – <i>Transformed divergence</i> (średnia: 0,59)					
	Dbbs(z)	Dbbs(ż)	Dbbs(b)	Dbcz	Brz
Dbbs(ż)	0,39				
Dbbs(b)	0,48	0,17			
Dbcz	0,73	0,45	0,14		
Brz	0,54	0,30	0,23	0,46	
So	0,96	1	1	1	1
Odległość Bhattacharyya – <i>Bhattacharyya distance</i> (średnia: 0,27)					
	Dbbs(z)	Dbbs(ż)	Dbbs(b)	Dbcz	Brz
Dbbs(ż)	0,15				
Dbbs(b)	0,01	0			
Dbcz	0,11	0,05	0,01		
Brz	0,38	0,08	0,23	0,20	
So	0,21	0,66	0,41	0,48	1

Analizy wykonano w dwóch wariantach. W pierwszym obiekty wzorcowe zostały potraktowane w sposób klasyczny, stosowany w klasyfikacji wielospektralnej, w której obiektami klasyfikowanymi są piksele. Utworzono zbiory charakterystyk (tzw. sygnatury) na podstawie oryginalnych wartości jasności, w czterech kanałach spektralnych, wszystkich pikseli znajdujących się w obrębie zdigitalizowanych koron. Drugi wariant polegał na obliczeniu najpierw wartości średnich jasności pikseli, w obrębie koron, oddzielnie dla każdego drzewa. Każde drzewo zostało w ten sposób opisane czterema wartościami średniej jasności obrazu. Rozkłady wartości średnich jasności pikseli dla koron, w przestrzeni wyznaczonej przez parę kanałów spektralnych 2 i 3, pokazano na rysunku 2.

Uzyskany zbiór wartości jasności potraktowano dalej tak, jak pojedyncze piksele i utworzono na ich podstawie sygnatury dla poszczególnych gatunków. Obliczone na podstawie sygnatur wskaźniki separowalności gatunków w obydwu wariantach zestawiono w tabelach 2 i 3. Aby polepszyć warunki porównania uzyskanych wyników przeliczono oryginalne wartości wskaźników na wielkości względne. Podane liczby są ułamkiem określającym stosunek wartości wskaźnika do jego wartości najwyższej. Należy podkreślić, że teledetekcyjne wskaźniki separowalności biorą pod uwagę łącznie dane zebrane z wszystkich kanałów spektralnych uwzględnionych w analizie.

Tabela 3. Wskaźniki separowalności gatunków (na podstawie wartości średnich pikseli w koronach drzew) – podano wartości względne wskaźników

Wskaźnik rozbieżności – <i>Divergence</i> (średnia 0,34)					
	Dbbs(z)	Dbbs(ż)	Dbbs(b)	Dbcz	Brz
Dbbs(ż)	0,09				
Dbbs(b)	0,13	0,09			
Dbcz	0,29	0,24	0,03		
Brz	0,26	0,21	0,21	0,37	
So	0,48	1	0,61	0,83	0,55
Transformowany wskaźnik rozbieżności – <i>Transformed divergence</i> (średnia 0,93)					
	Dbbs(z)	Dbbs(ż)	Dbbs(b)	Dbcz	Brz
Dbbs(ż)	0,81				
Dbbs(b)	0,91	0,80			
Dbcz	1	0,99	0,46		
Brz	0,99	0,98	0,98	1	
So	1	1	1	1	1
Odległość Bhattacharyya – <i>Bhattacharyya distance</i> (średnia 0,31)					
	Dbbs(z)	Dbbs(ż)	Dbbs(b)	Dbcz	Brz
Dbbs(ż)	0,15				
Dbbs(b)	0,06	0,09			
Dbcz	0,13	0,12	0,01		
Brz	0,31	0,03	0,24	0,30	
So	0,26	0,71	0,48	0,84	1

Tabela 4. Ocena separowalności gatunków w poszczególnych kanałach spektralnych – niebieskim (B), zielonym (G), czerwonym (R) i podczerwonym (IR) – wynik *t*-testu na wartościach średnich pikseli w koronach drzew

Porównywane gatunki		Statystycznie istotna różnica ?			
		Kanał 1 (B)	Kanał 2 (G)	Kanał 3 (R)	Kanał 4 (IR)
Dbbs(z)	Dbbs(z)		TAK	TAK	
	Dbbs(b)		TAK	TAK	TAK
	Dbcz		TAK	TAK	TAK
	Brz	TAK	TAK	TAK	
	So	TAK	TAK	TAK	TAK
Dbbs(z)	Dbbs(b)	TAK	TAK	TAK	TAK
	Dbcz	TAK	TAK	TAK	TAK
	Brz	TAK			
	So	TAK	TAK	TAK	TAK
Dbbs(b)	Dbcz				
	Brz	TAK	TAK	TAK	TAK
	So	TAK	TAK	TAK	TAK
Dbcz	Brz	TAK	TAK	TAK	TAK
	So	TAK	TAK	TAK	TAK
Brz	So	TAK	TAK	TAK	TAK

Celem analizy było także sprawdzenie, czy wszystkie kanały spektralne obrazów w równym stopniu są przydatne do odróżniania gatunków drzew. Zastosowano *t*-test, do sprawdzenia statystycznej istotności różnic ($p = 0,05$) pomiędzy średnimi wartościami jasności dla poszczególnych gatunków drzew w poszczególnych kanałach spektralnych. Wyniki zestawiono w tabeli 4.

Omówienie wyników

Teledetekcyjne wskaźniki separowalności pokazują, że spośród uwzględnionych w badaniach gatunków drzew (i ich faz fenologicznych) najłatwiejszym do odróżnienia od pozostałych jest sosna. Jest to wynik oczywisty ze względu na znaną w teledetekcji różnicę charakterystyk spektralnych gatunków iglastych i liściastymi. Tutaj została jeszcze wzmocniona przez efekt jesiennego przebarwienia się liści drzew. Najtrudniejszym do odróżnienia jest dąb czerwony, który w tej porze roku jest spektralnie bardzo podobny do brązowych liści dębu bezszypułkowego. Trudności sprawiać może też brzoza.

Wskaźniki wyliczone na podstawie wartości średnich jasności w obrębie poszczególnych koron (tab. 3) są lepsze od wskaźników obliczonych na podstawie wartości w pikselach (tab. 2). Wyraźniej wyższe są np. wartości w grupie gatunków liściastych. Wynik sugeruje, że ten sposób prowadzenia klasyfikacji treści zdjęć może dać rezultaty lepsze od klasyfikacji dotyczącej pojedynczych pikseli.

Podobne wnioski można wyciągnąć na podstawie analizy zawartości tabeli 4. Zastosowany test wykazał na przykład, że jasność obrazu dębu czerwonego nie różni się istotnie od jasności obrazu dębu bezszypułkowego (w fazie liści brązowych) we wszystkich kanałach spektralnych. Jasność obrazu brzozy nie różni się istotnie od jasności obrazu dębu bezszypułkowego (w fazie liści żółtych) w trzech kanałach spektralnych. W kanale 1 (niebieskim) nie można odróżnić między sobą niemal wszystkich dębów.

Wnioski

Uzyskane wyniki sugerują, że przeprowadzenie klasyfikacji treści obrazów na podstawie wartości średnich jasności obrazów koron drzew może dać rezultaty lepsze od klasyfikacji tradycyjnej, operującej na pojedynczych pikselach. Należy jednakże pamiętać, że wykonane analizy dotyczą specyficznych obrazów uzyskanych za pomocą unikatowego zestawu kamer niemetrycznych, w nietypowych warunkach oświetlenia oraz w porze roku, w której bardzo rzadko wykonywane są zobrazowania na potrzeby analizy stanu środowiska leśnego. Wykorzystano scenę, będącą jedynie wycinkiem ortomozaiki. Z tych powodów wnioski muszą być przyjmowane z dużą ostrożnością.

Praca dotyczy sposobu postępowania przy klasyfikacji, dla którego autorzy zaproponowali nazwę klasyfikacji quasi-obiektowej – przez podobieństwo do znanej w teledetekcji klasyfikacji obiektowej. Metoda wymaga sprawdzenia na liczniejszym materiale badawczym, uzyskiwanym w różnych warunkach przyrodniczych i technicznych. Warto rozpatrzyć między innymi problem wpływu sposobu wyznaczania zasięgów koron drzew na uzyskiwane wyniki. Możliwe jest na przykład ulepszenie procedury przez ograniczenie wielkości prób pobieranych w koronach drzew do ich części przyśrodkowych. Można się spodziewać, że w tej strefie koron warunki oświetlenia są bardziej stabilne i pobierane próby będą wewnętrznie mniej zróżnicowane pod względem jasności pikseli.

Literatura

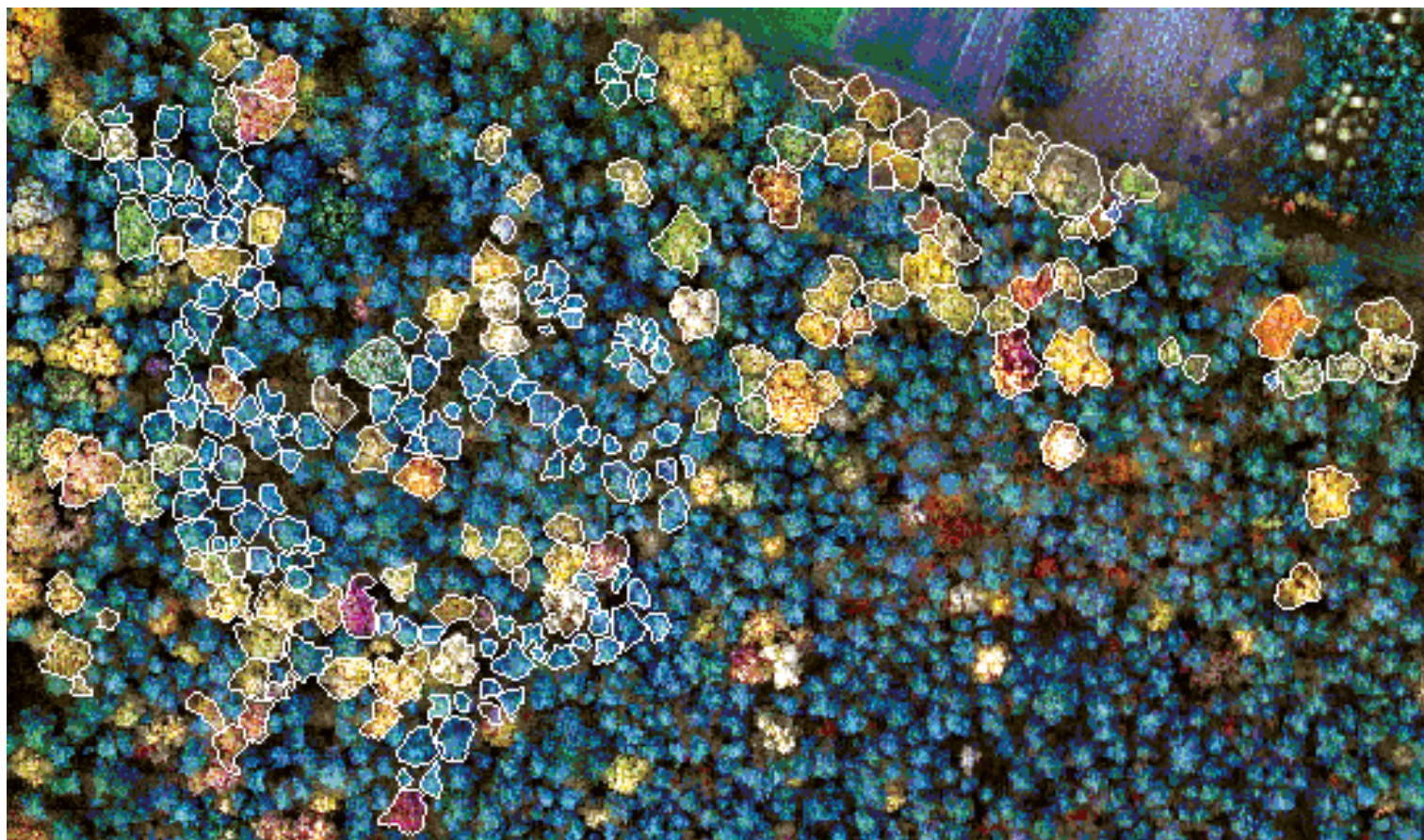
- Będkowski K., Stereńczak K., 2012: Rozpoznawanie dębu czerwonego (*Quercus rubra* L.) na zdjęciach lotniczych wykonanych w końcowej fazie sezonu wegetacyjnego. *Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej*, R. 14. (w druku).
- Definiens, 2004: Definiens Imaging. eCognition Users Guide – dokumentacja oprogramowania.
- Idrisi Taiga, 2009: Clark Labs, Worcester, USA.
- Stereńczak K., Będkowski K., 2011: Wykorzystanie numerycznego modelu terenu i modelu pokrycia terenu do klasyfikacji drzewostanów na podstawie ich struktury pionowej i gatunkowej. *Sylwan* 155 (4): 219-227.
- Taxus, 2010: Taxus SI Sp. z o.o. Samolot do fotografii z powietrza. Dokumentacja techniczna. Warszawa.
- Zmarz A., 2011: Zastosowanie bezzałogowych statków latających do pozyskania danych obrazowych o lesie. Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, SGGW w Warszawie. Praca doktorska.
- Zmarz A., Będkowski K., Miścicki S., Plutecki W., 2012: Ocena stanu zdrowotnego świerka na podstawie analizy zdjęć wielospektralnych wykonanych fotograficznymi aparatami cyfrowymi przenoszonymi przez bezzałogowy statek latający. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol. 23: 541-550.

Abstract

*The aim of this paper is to present a concept of a quasi-object-based method for tree species classification. Forest stands were composed mainly of scotch pine (*Pinus sylvestris* L.), sessile oak (*Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl.), with some birch (*Betula verrucosa* L.) and eastern red oak (*Quercus rubra* L.). The main crown characteristics used were: mean DN – values calculated separately for each species and spectral band. These statistics were used as signatures for training fields in supervised classification procedure. With distance measures such as Divergence, Transformed divergence and Bhattacharaya distance separation of each species was tested. The results of quasi-object-based and multispectral pixel-wise classification were compared. According to the results achieved the quasi-object-based classification was better and more suitable.*

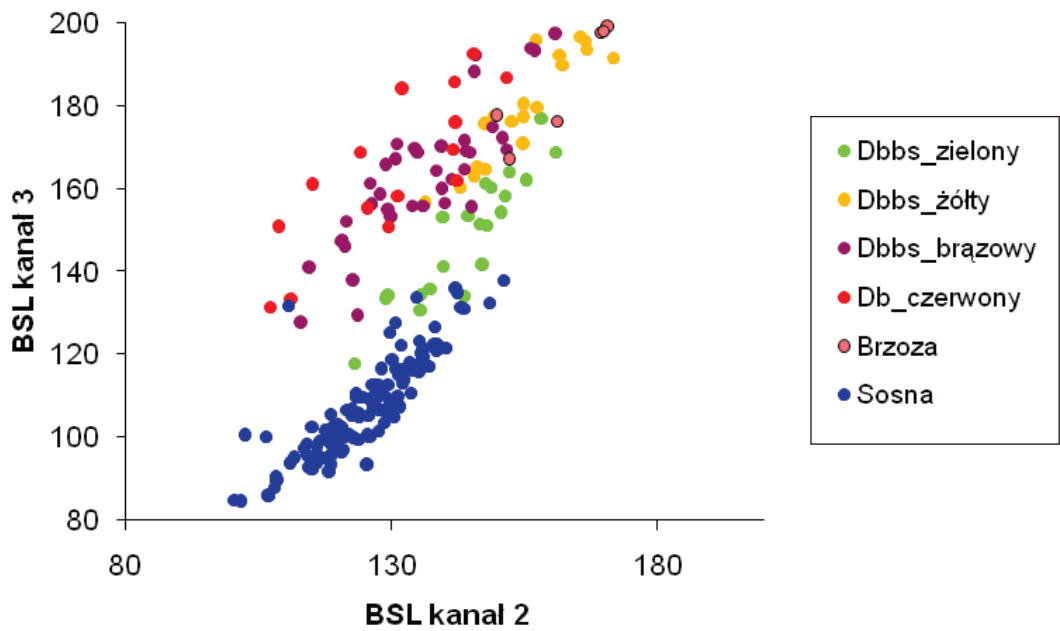
dr hab. inż. Krzysztof Będkowski, prof. SGGW
krzysztof.bedkowski@wl.sggw.pl
tel. 22 593-82-22

dr inż. Krzysztof Stereńczak
krzysztof.sterenczak@wl.sggw.pl
tel. 22 593-82-17



Rys. 1. Kompozycja barwna RGB zdjęć z BSL – pokazano zasięgi koron drzew uwzględnionych w badaniach

Wartości średnie jasności pikseli koron



Rys. 2. Rozkład punktów reprezentujących poszczególne korony drzew w dwuwymiarowej przestrzeni spektralnej