

Algorytm automatycznego oszacowania różnicowania gatunkowego drzewostanu z wykorzystaniem zdjęć RGB koron drzew

Jan Kotlarz, Mariusz Kacprzak

Instytut Lotnictwa, Zakład Teledetekcji, Al. Krakowska 110/112, 02-256 Warszawa

Streszczenie: Ocena różnorodności gatunkowej ekosystemów jest jednym z fundamentalnych działań mających na celu ochronę naturalnych siedlisk, ich zdrowotności i użyteczności dla człowieka. W artykule zaproponowany został algorytm oszacowania wskaźnika Shannona-Wienera różnorodności drzewostanów za pomocą analizy statystycznej (PCA) oraz klasyfikacji (ISOCCLASS) zdjęć RGB. Wykonanie zdjęć nie wymaga stosowania drogiego sprzętu i przy zachowaniu odpowiednich warunków oświetleniowych może być użyteczne w bieżącym monitoringu drzewostanów. Z drugiej strony, wskaźniki różnorodności wymagają walidacji in-situ. Algorytm posłużył w sierpniu 2016 r. do oszacowania różnorodności drzew w rezerwacie “Młochowski Grąd”. Za pomocą aparatu fotograficznego zintegrowanego z telefonem Microsoft Lumia 550 pozyskano 24 zdjęcia koron drzew w sześciu wchodzących w skład rezerwatu wydzieleniach leśnych. W wydzieleniu o najwyższej różnorodności wynik otrzymany za pomocą algorytmu ze względu na brak możliwości objęcia na pojedynczych zdjęciach wszystkich obecnych w nim gatunków nie odzwierciedlił faktycznego zróżnicowania drzewostanu. W pięciu wydzieleniach otrzymane wyniki były zbieżne z danymi in-situ zawartymi w Banku Danych o Lasach (współczynnik korelacji Pearsona = 0,967).

Słowa kluczowe: bioróżnorodność, algorytmika, PCA, teledetekcja, klasyfikacja, ISOCCLASS, leśnictwo

1. Wprowadzenie

Różnorodność biologiczna to bogactwo form życia, różnorodność gatunków, a także wewnątrzgatunkowa zmienność genetyczna i różnorodność wielogatunkowych układów przestrzennych, np. ekosystemów lub krajobrazów [28]. Różnorodność gatunkowa w danym ekosystemie może być szacowana przez pomiar dwóch parametrów: a) bogactwa gatunkowego (liczby gatunków, częstości występowania gatunków) oraz b) równomierności rozmieszczenia osobników danego gatunku w ekosystemie. Te dwa parametry odzwierciedlają powszechnie stosowane w badaniach ekologicznych wskaźniki różnorodności Shannona-Wienera [8] oraz dominacji gatunków Simpsona [9].

Badania nad gospodarką leśną w Europie Centralnej wykazały, że różnorodność gatunkowa ekosystemów leśnych jest dodatnio skorelowana z produktywnością [19]. Eksperymenty

przeprowadzone w Stanach Zjednoczonych wskazały, że zmniejszenie bioróżnorodności ekosystemów ma podobne znaczenie dla spadku ich kondycji jak brak dostępności azotu w glebie, susza czy nawet pożar, natomiast gospodarka oparta na jej zwiększaniu prowadzi do wzrostu dostępności usług ekosystemowych, w tym produkcyjnych i regulujących [29, 25]. Do najważniejszych czynników mających niekorzystny wpływ na różnorodność biologiczną należą przede wszystkim naturalne procesy ewolucyjne oraz działalność człowieka [15]. Jedną z przyczyn niekorzystnych zmian w wielofunkcyjności ekosystemów leśnych i ich bioróżnorodności jest przekształcenie ekosystemów stabilnych, takich jak lasy, pastwiska czy zbiorniki wodne, w niestabilne, takie jak pola uprawne czy tereny zabudowane. Również fundamentalny proces, jakim jest dynamika pobierania wody i składników pokarmowych przez drzewa zależy pośrednio od stopnia degradacji siedlisk [10, 25]. Chociaż w Europie obserwujemy obecnie zjawisko ponownego zalesiania, to w Afryce, Ameryce Południowej i Azji nadal następuje szybki proces wylesiania (deforestacji). W Polsce uprawy zbożowe zajmują podobną powierzchnię jak lasy warunkując rozmieszczenie wielu organizmów oraz perspektywy ich przeżycia i migracji [12]. Nieuniknionym efektem globalizacji jest wprowadzenie do rodzimych ekosystemów gatunków obcych. Mogą być one groźne stając się konkurentami, pasożytami lub drapieżcami dla gatunków rodzimych zmniejszając ich różnorodność. Straty wynikające z wprowadzenia gatunków inwazyjnych oszacowano w Stanach Zjednoczonych, Wyspach

Autor korespondujący:

Jan Kotlarz, jan.kotlarz@ilot.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 17.01.2017 r., przyjęty do druku 27.02.2017 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

Brytyjskich, Indiach, Afryce i Brazylii na 314 mld dolarów [24]. Dodatkowym czynnikiem zwiększającym podatność na utratę bioróżnorodności są zanieczyszczenia powietrza i gleby oraz związane ze zmianami klimatu coraz częstsze występowanie suszy [21, 2]. Obecnie kraje ubogie dysponują ekosystemami o największej bioróżnorodności (las tropikalne), natomiast flora i fauna krajów najbogatszych są stosunkowo ubogie (Kędziara 2010). Jednym z postulowanych w 1999 r. działań [30] mających przyczynić się do zachowania bioróżnorodności jest powszechna, globalna inwentaryzacja gatunków i pomiar dynamiki zmiany wskaźników różnorodności. Aby cel ten mógł zostać osiągnięty wymagane jest stworzenie i upowszechnienie narzędzi użytecznych do pomiaru wskaźników różnorodności oraz automatyzacja przetwarzania danych.

Zaproponowana w artykule metodyka oszacowania różnorodności pozwala na wstępny pomiar wskaźnika Shannona-Wienera za pomocą analizy zobrazowań fotograficznych wykonanych z użyciem powszechnie dostępnych, nieprzystosowanych do wykonywania zobrazowań fotogrametrycznych aparatów cyfrowych. Algorytm oparty o analizę czynnikową zdjęć wielospektralnych był już stosowany w próbach oszacowania wskaźników bioróżnorodności i identyfikacji gatunkowej kompleksów leśnych w Polsce [6, 13]. Jego bezpośrednia powszechna aplikacja nie jest możliwa ze względu na niedostępność na rynku wielospektralnych, odpowiednio skalibrowanych aparatów cyfrowych. Proponowany algorytm i opracowany na jego podstawie software znajdują zastosowanie w przetwarzaniu tradycyjnych zdjęć RGB wykonywanych w terenie umożliwiając automatyczny pomiar wskaźnika różnorodności, przesłanie go do bazy danych i mógł być wykorzystany w typowych projektach monitorujących ekosystemy, np. w projekcie HESOFF.

2. Metodyka oszacowania różnorodności

Typowe, powszechnie dostępne aparaty cyfrowe wyposażone są w matryce CCD o rozdzielczości do 41 Mpx oraz efektywności kwantowej rzędu 50–70% dla zakresu widzialnego oraz bliskiej podczerwieni. Ze względów marketingowych producenci

aparatów cyfrowych stosują często filtr optyczny blokujący podczerwień [18]. W tabeli 1 zestawiono typowe parametry kamer montowanych w telefonach komórkowych (liczba sensorów CCD jest znacznie mniejsza od liczby modeli telefonów komórkowych).

Szerokość spektralna (rozdzielczość) typowego sensora RGB wynosi od kilkudziesięciu do ponad 100 nm, dodatkowo ze względu na niewielką odległość kanałów optycznych (R: 600–650 nm, G: 520–570 nm, B: 420–500 nm) każdy z nich może rejestrować w pewnej części fotony pozostałych kanałów (rys. 5). Zakładamy zatem, że do dalszych analiz dysponujemy zobrazowaniem w trzech szerokich kanałach optycznych promieniowania widzialnego o wysokiej efektywności kwantowej i rozdzielczości co najmniej kilku megapikseli.

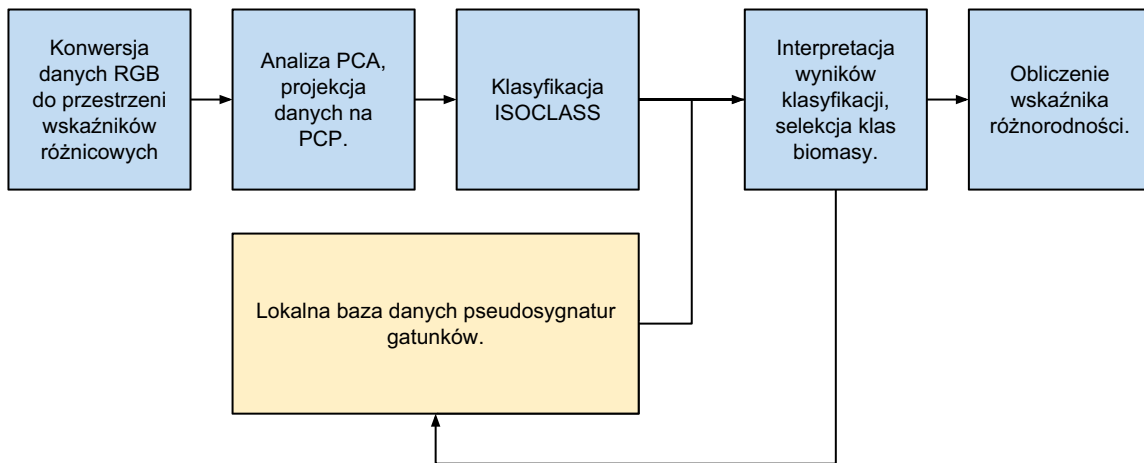
W przeciwieństwie do profesjonalnych badań różnicowania pokrycia terenu za pomocą zdjęć satelitarnych [16] i lotniczych [20] za pomocą samolotów bezzałogowych [11] oraz lekkich samolotów załogowych [17, 31] zobrazowania wykorzystywane w tej pracy wykonywane były z poziomu terenu, a nie z pułapu rzędu kilkuset metrów (zdjęcia lotnicze) lub kilkuset kilometrów (satelitarne). Do danych obrazowych tego typu nie można zatem wprost zastosować typowych algorytmów oszacowania różnorodności używanych w klasycznym postprocessingu.

Zaproponowany algorytm składa się z pięciu niezależnych kroków:

- 1) konwersji danych obrazowych z przestrzeni barw RGB do przestrzeni znormalizowanych wskaźników różnicowych,
- 2) analizy PCA danych wraz z rzutowaniem na płaszczyznę głównych składowych,
- 3) klasyfikacji typu ISOCCLASS w przestrzeni głównych składowych,
- 4) analizy parametrów klas obiektów widocznych na zobrazowaniu, selekcji klas interpretowanych jako biomasa,
- 5) obliczeniu wskaźnika bioróżnorodności na podstawie liczby klas biomasy i ich licznosci (rys. 1).

Tab. 1. Parametry typowych sensorów montowanych w telefonach komórkowych [<http://cameraimagesensor.com/size/#190,238,237,236,193,b>]
Tab. 1. Typical sensors integrated with mobile phones parameters [<http://cameraimagesensor.com/size/#190,238,237,236,193,b>]

	Nokia 808 PureView	Nokia Lumia 1020	Samsung Galaxy S4 I9500	Apple iPhone 5	HTC One X
Producent	brak danych	brak danych	Sony	Sony	Samsung
Nazwa handlowa	PureView Pro imaging technology	PureView Pro imaging technology	Exmor RSTM	brak danych	brak danych
Typ wielkości	1/1,2"	2/3"	1/3,06"	1/3,2"	1/3,2"
Architektura	CMOS	BSI-CMOS	BSI-CMOS	BSI-CMOS	BSI-CMOS
Typ matrycy	Color Filter Array (Bayer)	Color Filter Array (Bayer)	Color Filter Array (Bayer)	Color Filter Array (Bayer)	Color Filter Array (Bayer)
Wymiary [mm]	10,67×8,00	8,80×6,60	4,69×3,53	4,54×3,42	4,54×3,42
Całkowita liczba pikseli	41 Mpx	41 Mpx	brak danych	brak danych	brak danych
Model	brak danych	brak danych	IMX135	brak danych	S5K3H2YX
Maksymalna rozdzielczość obrazu	7728×5368 px	7728×5368 px	4128×3096 px	3264×2448 px	3264×2448 px



Rys. 1. Schemat algorytmu obliczającego wskaźnik bioróżnorodności Shannona-Wienera na podstawie analizy zdjęcia RGB
Fig. 1. Diagram of the algorithm calculating the Shannon-Wiener indicator of biodiversity based on RGB images analysis

2.a. Konwersja danych z przestrzeni RGB do przestrzeni wskaźników

Zdjęcie RGB można potraktować jako trójwymiarową tablicę danych $I(x, y, c)$, gdzie x i y są współrzędnymi piksela na matrycy CCD, natomiast c przyjmuje wartości ze zbioru $\{0, 1, 2\}$ odpowiednio dla zarejestrowanego sygnału w kanale czerwonym, zielonym i niebieskim. Przetwarzając zdjęcia niemetryczne, wykonywane z poziomu terenu należy założyć znaczną wariację refleksyjności obiektu (skorelowanej z zarejestrowanym na matrycy sygnałem) spowodowaną nierównomiernymi warunkami oświetleniowymi [11]. Aby zmniejszyć wpływ tego efektu w pierwszym kroku następuje konwersja danych z przestrzeni barw RGB do przestrzeni wskaźników różnicowych WRGB zdefiniowanych następująco:

$$\begin{aligned} W(x, y, 0) &= \frac{I(x, y, 0) - I(x, y, 1)}{I(x, y, 0) + I(x, y, 1)} \\ W(x, y, 1) &= \frac{I(x, y, 1) - I(x, y, 2)}{I(x, y, 1) + I(x, y, 2)} \\ W(x, y, 2) &= \frac{I(x, y, 2) - I(x, y, 0)}{I(x, y, 2) + I(x, y, 0)} \end{aligned} \quad (1)$$

Zakładając, że zależność rejestrowanego strumienia fotonów I od oświetlenia L i współczynnika refleksyjności w kanale optycznym i R_i dana jest zależnością $I(x, y, c) = R_i \cdot L$, to

$$W(x, y, i) = (R_i L - R_j L) / (R_i L + R_j L) = (R_i - R_j) / (R_i + R_j) \quad (2)$$

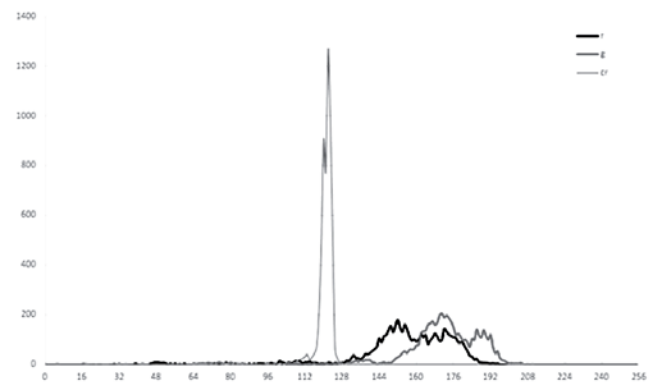
gdzie i, j odpowiadają kanałom optycznym zawartym w definicji (1).

Widzimy, że wartości W nie są w tym modelu zależne od oświetlenia L , a zależą jedynie od refleksyjności fotografowanego obiektu w kanałach optycznych i, j . Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe przetworzenie tego typu. Dla zaznaczonego ramką fragmentu liścia dębu obserwowana wariacja refleksyjności w kanałach RGB jest wyższa niż 7% ($> 20/256$), natomiast wariacja tego samego obszaru na zdjęciu po przetworzeniu jest niższa niż 2% ($< 5/256$). Wstępne przetworzenie zdjęcia pozwala lepiej zinterpretować zależności w zarejestrowanej scenie. Zabieg ten ułatwia odpowiednie przypisanie pikseli do poszczególnych klas. Odpowiednie histogramy dla kanałów R i G oraz odpowiadającego im wskaźnika różnicowego przedstawiono na rysunku 3.



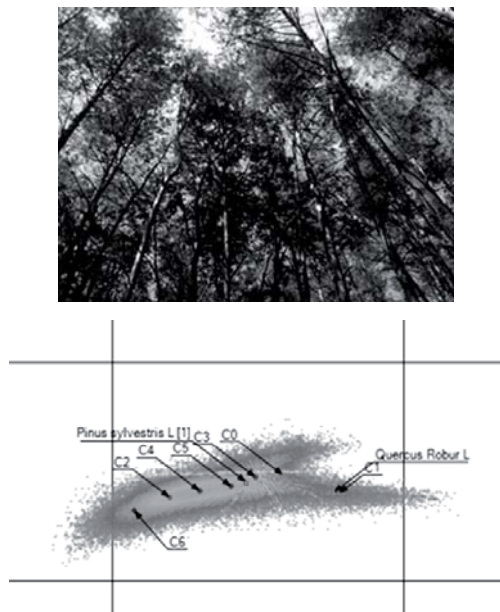
Rys. 2. Przykładowe przetworzenie z przestrzeni barw RGB do przestrzeni wskaźników różnicowych WRGB. Po lewej stronie zaznaczono strzałkami dwa liście dębu, jeden w miejscu nasłonecznionym, drugi w cieniu. W przestrzeni RGB ich refleksyjność znacząco się różni, natomiast w przestrzeni wskaźników różnicowych oba obiekty charakteryzują się podobnymi wartościami

Fig. 2. Sample processing from the RGB color space to WRGB differential indicators space. On the left two oak leaves are marked by arrows, one in direct sunlight, the other in the shadow. In the RGB color space reflectance of those two leaves varies considerably, in the WRGB space they have similar values



Rys. 3. Histogram kanałów optycznych R i G fragmentu liścia dębu (zob. rys. 2, badany fragment zaznaczono ramką) oraz wskaźnika różnicowego odpowiadającego tym kanałom. Odchylenie standardowe dla kanałów R i G wynosi 23,4 oraz 21,7, natomiast dla wskaźnika 3,0

Fig. 3. Optical channels R and G histogram of the oak leaf fragment (see. fig. 2, a test fragment is marked by a frame) and the differential indicator corresponding to these channels histogram. The standard deviation of the R and G channels are 23.4 and 21.7, of the indicator is 3.0



Rys. 4. Zdjęcie RGB koron drzew w rezerwacie „Młochowski Grąd” (wydzielenie leśne SO043) wykonane aparatem zintegrowanym z telefonem Microsoft Lumia 550 i odpowiadający mu rzut danych obrazowych na przestrzeń głównych składowych PCP (screen z oprogramowania Emma Biodiversity 0.2). Dwie spośród sześciu klas zidentyfikowane zostały jako biomasa: C1 (16 362 px) jako dąb bezszypułkowy, natomiast C3 (57 110 px) jako sosna zwyczajna. Pozostałe klasy dotyczą: pni drzew, nieba oraz chmur. Zgodnie z metodyką oszacowania różnorodności opisaną w paragrafie 2.e indeks różnorodności będzie wynosić 0,53

Fig. 4. RGB image of the tree crowns in the reserve “Młochowski Grąd” (forest stand SO043) taken by the camera integrated with Microsoft Lumia 550 smartphone and the corresponding projection of this image data onto the principal components plane PCP (Emma Biodiversity 0.2 software screen). Two of the six classes were identified as biomass: C1 (16 362 px) as the oak, and C3 (57 110 px) as the pine. Other classes were identifies as: tree trunks, sky and clouds. According to the methodology described in the section 2.e diversity index of this area will be 0.53

Efektem pierwszego kroku jest zatem znaczne ograniczenie wpływu zróżnicowania oświetlenia obiektów zobrazowanych na fotografii na obserwowaną refleksję.

2.b. Analiza PCA

Typowo analiza głównych składowych (PCA) prowadzona jest w oparciu o zdjęcia wielo- i hiperspektralne [26] wykorzystując fakt, że dla wielu bliskich kanałów optycznych obserwowane wartości refleksji są ze sobą wysoko skorelowane. W przypadku zdjęć RGB do dyspozycji są jedynie trzy kanały optyczne, jednak w przeciwieństwie do zdjęć wielospektralnych są one bardzo szerokie i w znacznej części rejestrują te same fotony (rys. 5).

Stosując zatem analizę PCA dla współrzędnych pikseli w przestrzeni WRGB uzyskuje się trzy wektory własne i odpowiadające im wartości własne. Piksele zdjęcia określone dotąd w przestrzeni wskaźników różnicowych można zrzutować na dwa z wektorów własnych o najwyższych odpowiadających im wartościach własnych, uzyskując rozkład danych obrazowych na płaszczyźnie głównych składowych (PCP) przy minimalnej możliwej utracie informacji [6, 26].

2.c. Klasyfikacja ISOCLASS

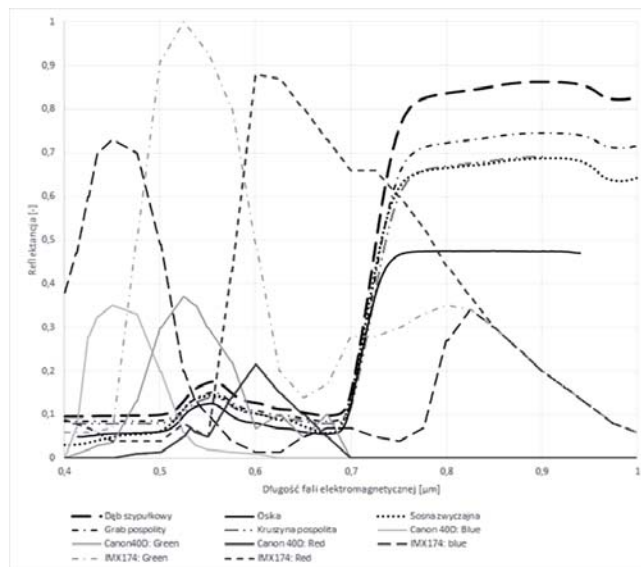
Kolejnym etapem przetworzenia jest zdefiniowanie odpowiednich klas na podstawie współrzędnych pikseli na płaszczyźnie głównych składowych PCP. W tradycyjnej teledetekcji cyfrowej w pierwszym kroku klasyfikacji następuje zdefiniowanie klas w oparciu o pola testowe (ang. *training areas*). Można tego dokonać zarówno w trybie automatycznym jak i manualnym

[1]. Zdefiniowane klasy powinny cechować się niską wariancją wartości w poszczególnych zakresach spektralnych [22]. W podejściu manualnym operator decyduje o liczbie i typie klas, natomiast w stosowanym tutaj podejściu automatycznym (klasyfikacja nienadzorowana) możliwe jest automatyczne zdefiniowanie różnorodnych (rozseparowanych) klas w oparciu o wartości statystyczne pikseli [4].

Jednym z algorytmów wykorzystywanych w podejściu automatycznym jest algorytm ISOCLASS. Po zliczeniu wszystkich pikseli obrazu źródłowego następuje grupowanie pikseli w klasy odpowiednio od siebie odległe w wybranej przestrzeni (stosowana jest tutaj zwykła odległość euklidesowa na płaszczyźnie PCP). W pierwszym kroku (1) obliczany jest dystans każdego piksela od wartości średnich wygenerowanych klas, następnie (2) w oparciu o tę wartość następuje przypisanie do klas [7]. W ostatnim kroku (3) obliczane są wartości statystyczne położenia na PCP dla poszczególnych grup (klas). Proces (1)–(3) jest powtarzany aż do momentu, w którym żaden z pikseli nie zmieni swojej klasy po aktualizacji wartości średnich ich położenia na PCP. Parametrami sterującymi pracą funkcji ISOCLASS mogą być maksymalna liczba klas lub/i maksymalny poziom odchylenia wartości wewnątrz danej klasy.

2.d. Interpretacja parametrów klas

W podejściu typowym dla klasyfikacji pokrycia terenu z użyciem metod teledetekcyjnych stosuje się wskaźniki mające separować biomasa (lasy, łąki, parki, zakwity cyjanobakterii) od materii nieożywionej (drogi, budynki, zbiorniki czystej wody). Najbardziej rozpowszechnionym wskaźnikiem tego typu jest znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji NDVI. Wskaźniki tego typu wykorzystują do detekcji biomasy różnicę w refleksji między kanałem czerwonym a bliską podczerwienią (rys. 5) [3, 27]. Różnica ta wynika z absorpcji promieniowania czerwonego przez rośliny w procesie fotosyntezy i wysokiej refleksji promieniowania bliskiej podczerwieni ze względu na budowę przestrzeni międzykomórkowych w liściach. Metoda ta nie jest użyteczna dla standardowych detektorów RGB ze względu na ich niską efektywność kwantową powyżej 0,70 μm, filtry blokujące bliską podczerwień lub jednoczesną rejestrację zakresu widzialnego i bliskiej podczerwieni przez sensory R, G lub B.



Rys. 5. Zestawienie przykładowych sygnałów spektralnych refleksyjności roślinności (dąb bezszypułkowy, osika, sosna zwyczajna, grab pospolity i kruszcyna pospolita) [5] ze standardem efektywności kwantowej sensora Canon 40D oraz sensora wykorzystywanego w telefonach komórkowych IMX174

Fig. 5. Sample spectral reflectance signature of vegetation (oak, aspen, pine, hornbeam, alder) comparison [5]. The standard quantum efficiency of the Canon 40D sensor and used in mobile phones IMX174 sensor comparison

Jedyną metodą na separację klas reprezentujących biomasy od innych jest zastosowanie algorytmu samouczącego się. Parametry (średnie współrzędne w przestrzeni WRGB) każdej klasy są początkowo klasyfikowane manualnie.

W trakcie tego procesu ustalone zostają średnie wartości współrzędnych w przestrzeni WRGB biomasy W_B oraz ich odchylenia standardowe σ_B . Po zakończeniu etapu klasyfikacji manualnej w przypadku zaobserwowania klasy o wartościach średnich współrzędnych W mieszczących się w zakresie:

- $W \in (W_B - \sigma_B, W_B + \sigma_B)$ – klasa jest interpretowana jako biomasa,
- $W \in (W_B - 2\sigma_B, W_B - \sigma_B] \vee [W_B - \sigma_B, W_B - 2\sigma_B)$ – klasa przeznaczona do klasyfikacji manualnej, a parametry W_B i σ_B zostają zaktualizowane,
- w pozostałych przypadkach klasa jest interpretowana jako materia nieożywiona.

2.e. Obliczenie wskaźnika różnorodności

W wyniku przeprowadzenia powyższej klasyfikacji zdjęcia otrzymujemy: a) liczbę klas, w tym liczbę n klas określonych jako biomasa, oraz b) liczbę pikseli zdjęcia przypisanych do danej klasy. Dane te mogą być uznane jako estymatory parametrów określających różnorodność gatunkową ekosystemu wymienione we wstępie, to jest a) bogactwa gatunkowego i b) równomierności rozmieszczenia gatunków. Dysponujemy zatem pełną informacją aby obliczyć wskaźnik H różnorodności Shannona-Wienera zdefiniowany następująco:

$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i) \quad (3)$$

gdzie [14]:

- n jest estymatorem bogactwa gatunkowego,
- p_i będące stosunkiem powierzchni zajmowanej na zdjęciu przez klasę i do powierzchni zdjęcia zajmowanej przez wszystkie klasy zdefiniowane jako biomasa.

Wskaźnik obliczony w ten sposób będzie odzwierciedlał różnorodność obszaru zobrazowanego na zdjęciu.

3. Badania testowe różnorodności kompleksów leśnych

W sierpniu 2016 r. wykonano badanie terenowe za pomocą opracowanego algorytmu w rezerwacie „Młochowski Grąd” znajdującym się w gminie Nadarzyn (powiat Pruszków). Rezerwat o powierzchni 27,00 ha znajduje się w środkowej części Lasu Młochowskiego, przy drodze leśnej z Krakowian do Siestrzeni. Celem ochrony jest zachowanie fragmentów naturalnych zbiorowisk leśnych z zespołami grądu wysokiego i boru mieszanego. Występujące tu drzewostany dębowo-sosnowe i dębowe liczą sobie do 180 lat. W dolnym piętrze występuje grab i dąb, natomiast w poszyciu dominuje kruszyna. Występujące w rezerwacie dąbrowy należą do najstarszych na Mazowszu. Rezerwat zgodnie z podziałem taksacyjnym dzieli się na 6 wydziełów leśnych.

W trakcie badania wykonano 24 zdjęcia aparatem zintegrowanym z telefonem komórkowym Microsoft Lumia 550, po cztery zdjęcia w każdym wydziale leśnym. Parametry sensora zebrano w tabeli 2.

Każde ze zdjęć wykonano aparatem skierowanym pod kątem zenitalnym 30–45°. Zgodnie z parametrami geometrycznymi aparatu każdorazowo na zdjęciu widoczny był obszar koron drzew o średnicy 25–35 m. Każde zdjęcie otagowano współrzędnymi odczytanymi z odbiornika GPS zintegrowanego z telefonem komórkowym. Przypisany do każdej z 24 lokalizacji współczynnik różnorodności został umieszczony w serwisie GIS. Dla każdego wydziału leśnego obliczono sumaryczny wskaźnik różnorodności oraz na podstawie danych taksacyjnych dostępnych w Banku Danych o Lasach (www.bdl.lasy.gov.pl) obliczono

Tab. 2. Parametry układu optycznego zintegrowanego z urządzeniem Microsoft Lumia 550

Tab. 2. The parameters of the optical system integrated with Microsoft Lumia 550 device

Parametr	Charakterystyka
Rozdzielczość	5,0 Mpx
Wielkość fizyczna sensora CCD	¼ cala
f/przysłona	f/2,4
Ogniskowa	28 mm

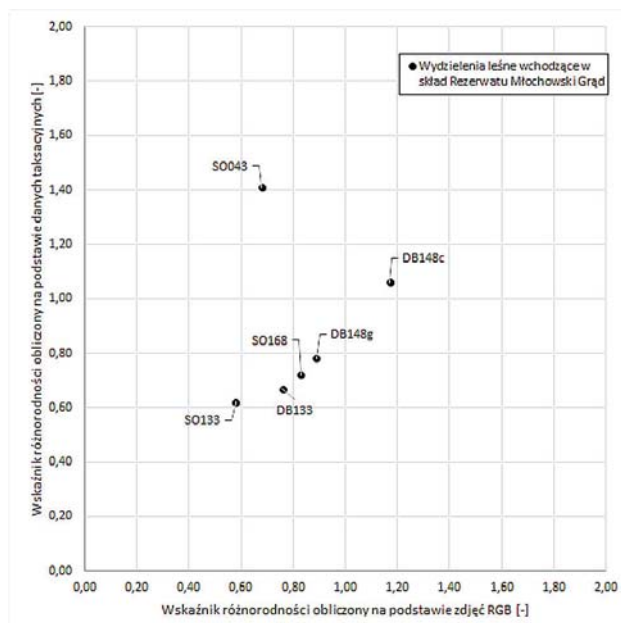
analogiczny wskaźnik różnorodności opierając się na udziale procentowym koron drzew piętra najwyższego.

4. Wyniki pomiaru różnorodności

Wyniki obliczeń wykonanych na podstawie analizy zdjęć oraz na podstawie danych z Banku Danych o Lasach przedstawiono w tabeli 3 i na rysunku 6.

5. Dyskusja wyników

Należy podkreślić, że dane taksacyjne obrazują różnorodność koron drzew całego obszaru wydzielenia leśnego (2,87–8,43 ha), natomiast suma zobrazowanej przez cztery zdjęcia RGB powierzchni w ramach jednego działu wynosiła 0,3–0,4 ha, co stanowi zaledwie 3,6% – 13,9% jego powierzchni. Pomimo iż pomiar za pomocą zdjęć RGB można traktować jako punktowy, to zaproponowana metodyka w poprawny sposób (współczynnik korelacji Pearsona = 0,967) oszacowała wskaźnik zróżnicowania koron drzew w pięciu wydzieleniach leśnych (SO133, DB133, SO168, DB148c i DB148g). Wydzielenie SO043 charakteryzuje się najwyższą różnorodnością koron drzew spośród badanych. Można postulować, że błąd oszacowania wskaźnika wynika z braku możliwości objęcia na czterech



Rys. 6. Wartości wskaźnika Shannona-Wienera dla 6 wydziałów leśnych wchodzących w skład Rezerwatu „Młochowski Grąd” obliczone na podstawie zdjęć RGB i danych taksacyjnych z Banku Danych o Lasach

Fig. 6. The Shannon-Wiener indicator values for 6 forest stands in the Reserve „Młochowski Grąd” calculated using RGB images and data from the Forest Data Bank

Tab. 3. Wartości wskaźnika Shannona-Wienera dla 24 punktów pomiarowych oraz dla sześciu wydzieleń leśnych

Tab. 3. The Shannon-Wiener indicator values for 24 measurement points and the six forest stands

Wydziałenie leśne	Powierzchnia [ha]	Długość geograficzna wschodnia	Szerokość geograficzna północna	Wskaźnik różnorodności gatunkowej drzew		
				obliczony na podstawie zdjęć RGB		obliczony na podstawie danych taksacyjnych dla działu leśnego
				dla poszczególnych punktów pomiarowych	dla wydziałenia leśnego	
SO133	5,51	20,7681	52,0328	0,61	0,58	0,62
		20,7645	52,0313	0,54		
		20,7666	52,032	0,69		
		20,7687	52,0319	0,41		
DB133	8,43	20,768	52,0305	0,73	0,76	0,67
		20,770	52,095	0,69		
		20,7667	52,0291	0,84		
		20,7655	52,0303	0,67		
DB148c	2,99	20,767	52,0285	1,04	1,17	1,06
		20,768	52,0275	0,93		
		20,7697	52,0283	1,02		
		20,7691	52,0284	0,96		
SO043	3,48	20,7685	52,0273	0,30	0,68	1,41
		20,7691	52,0264	0,53		
		20,7704	52,0277	0,41		
		20,7712	52,0281	0,81		
SO168	2,87	20,7727	52,0265	0,68	0,83	0,72
		20,7702	52,026	0,69		
		20,7711	52,0265	0,87		
		20,7713	52,0272	0,56		
DB148g	3,79	20,7704	52,0256	0,82	0,89	0,78
		20,7718	52,0258	0,73		
		20,7726	52,0248	0,47		
		20,7725	52,0235	0,64		

zdjęciach wszystkich gatunków drzew w proporcjach właściwych dla całego drzewostanu co jest znanym błędem oszacowania wskaźnika Shannona-Wienera. W wydziale SO43 (wg danych taksacyjnych) występuje duży udział brzozy (20%), dębu (10%) i grabu (10%). Ponieważ w wydziale wykonano zdjęcia tylko w czterech miejscach nie wszystkie te gatunki zostały na nich ujęte. Zgodnie z literaturą [Pielou 1966] wraz ze wzrostem liczby gatunków w populacji zwiększa się niepewność punktowych pomiarów ich różnorodności. W obu wydziałach o najwyższej różnorodności gatunkowej obliczonej na podstawie danych taksacyjnych (SO43 i DB148g) obserwujemy

punktowe pomiary zarówno o wysokiej ($\geq 0,80$) jak i o niskiej ($< 0,55$) wartości wskaźnika Shannona-Wienera (rys. 7). Z drugiej strony można przypuszczać, że zaobserwowana rozbieżność pomiędzy wskaźnikami obliczonymi na podstawie danych taksacyjnych a danymi uzyskanymi na podstawie zdjęć wynika z nieprecyzyjności oszacowania składu gatunkowego metodami tradycyjnymi. Może to świadczyć o skuteczności metod teledetekcyjnych w walidacji wskaźników pozyskiwanych metodami klasycznymi.

Naturalnym ograniczeniem stosowania zaproponowanego algorytmu są oczywiście: pora dnia i roku wykonywania zdjęć.

Zarówno w oryginalnych danych obrazowych RGB jak i w przestrzeni wskaźników WRGB ciemne zdjęcia będą skutkowały współrzędnymi punktów bliskimi punktowi (0, 0, 0). Kategoryzacja pikseli zdjęcia skupionych wokół jednego punktu staje się bardzo trudna i może nie dać dobrego rezultatu. Zdjęcia wykonywane podczas obrazowania rezerwatu "Młochowski Grąd" wykonywane były przy bardzo dobrym oświetleniu słonecznym i w trakcie trwania sezonu wegetacyjnego, dzięki czemu separacja kategorii odpowiadających poszczególnym gatunkom drzew na podstawie barwy ich koron mogła być wykonana prawidłowo.

6. Wnioski

Wynik badania potwierdził użyteczność algorytmu w badaniu różnorodności koron drzewostanów o wskaźniku różnorodności poniżej 1,40. Dla drzewostanów bardziej zróżnicowanych, wskaźników z pojedynczych zdjęć nie można było przyjąć jako wskaźników dla całych wydzieł leśnych. Pozyskane wartości wskaźników są użyteczne dla opisu miejscowej różnorodności i w ten sposób spełniają postulaty Wilsona [30] narzędzia użytecznego w powszechnym badaniu różnorodności gatunkowej w zakresie piętra koron drzewostanu.

Należy zauważyć, że w badaniu wykorzystano pojedynczy model sensora. Bazę danych poszczególnych gatunków stworzono również na użytek tego konkretnego modelu podczas wcześniejszych badań. Ze względu na różną czułość spektralną sensorów (rys. 5) stworzona baza może być nieużyteczna dla użytkownika sensora o innej czułości. Możliwość konwersji baz danych między sensorami o różnej czułości powinna stać się przedmiotem dalszych badań, gdyż konieczność manualnej konfiguracji algorytmu w pierwszym etapie jego stosowania jest jedną z największych przeszkód w pełnej automatyzacji procesu określania różnorodności za jego pomocą.



Rys. 7. Kategoryzacja punktowych wartości wskaźnika Shannona-Wienera dla 6 wydzieł leśnych wchodzących w skład rezerwatu „Młochowski Grąd” (w miejscach wykonywania zdjęć RGB – oznaczenie pentagonami) i danych taksacyjnych z Banku Danych o Lasach (oznaczenie barwą tła dla każdego wydziału leśnego). Barwa czerwona oznacza wartość H wskaźnika Shannona-Wienera $H < 0,55$, żółta: $0,55 \geq H > 0,80$, zielona: $\geq 0,80$

Fig. 7. Categorization of the Shannon-Wiener indexes values for 6 forest stands in the "Młochowski Grąd" reserve (in RGB images acquiring places – marked by pentagons) and data calculated using Forest Data Bank (marked as background color for each forest stand). For Shannon-Wiener H index $H < 0.55$ marked as red, $0.55 \geq H > 0.80$ marked as yellow, ≥ 0.80 marked as green

Podziękowania

Autorzy artykułu dziękują Instytutowi Lotnictwa za pomoc w realizacji badań nad sensorami oraz Nadleśnictwu Chojnów za pomoc w realizacji badań terenowych.

Bibliografia

1. Aplin P., Atkinson P.M., *Predicting missing field boundaries to increase per-field classification accuracy*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", Vol. 70, No. 1, 2004, 141–149.
2. Archaux F., Wolters V., *Impact of summer drought on forest biodiversity: what do we know?*, "Annals of Forest Science", Vol. 63, No. 6, 2006, 645–652, DOI: 10.1051/forest:2006041.
3. Bartold M., *Opracowanie maski obszarów leśnych w celu monitoringu kondycji zdrowotnej lasów w Polsce na podstawie wieloletnich obserwacji satelitarnych*, „Leśne Prace Badawcze”, 77(2), 2016, 141–150.
4. Cihlar J., Ly H., Xiao Q., *Land cover classification with AVHRR multichannel composites in northern environments*, "Remote Sensing of Environment", 58, 1996, 36–51.
5. Clark R.N., Swayze G.A., Wise R., Livo E., Hoefen T., Kokaly R., Sutley S.J., *USGS digital spectral library splib06a: U.S. Geological Survey*, Digital Data Series 231, 2007.
6. Czapski P., Kotlarz J., Kubiak K., Tkaczyk M., *Analiza czynnikowa zdjęć wielospektralnych*, Prace Instytutu Lotnictwa 234, 2014(1), 143–150.
7. Erdas Mapper User Guide: http://tnij.org/erdasmapper_ug (Dostęp: 12.2016)
8. Falińska K., *Ekologia Roślin*. PWN, Warszawa 2004, 511.
9. Jaskulska I., Osiński G., Jaskulski D., Mądry A., *Różnorodność odmian roślin uprawnych w grupie ankietowanych gospodarstw w regionie kujawsko-pomorskim*, „Fragmenta Agronomica”, tom 29, 2012, 41–48.
10. Józefkiewicz-Kotlarz J., Prusinkiewicz Z., *Dynamika odżywiania 70-letniej sosny zwyczajnej (Pinus sylvestris L.) na siedlisku boru suchego*, Rocz. Glebozn., T. 51, nr 1–2, 2000, 47–64.
11. Kacprzak M., Rotchimmel K., *Tworzenie produktów fotogrametrycznych z wykorzystaniem zdjęć wykonanych blokiem kamer niemetrycznych*, Prace Instytutu Lotnictwa, 2(243), 2016, 120–129.
12. Kędziora A., *Zagrożenia i ochrona różnorodności biologicznej*, Nauka 2010 (4), s. 107.
13. Kotlarz J., Kubiak K., Kacprzak M., Czapski P., *Oszacowanie różnorodności gatunkowej drzewostanów z wykorzystaniem ich refleksyjności*, Sylwan, 160(12), 2016, 1036–1045.
14. Krebs Ch., *Ekologia. Eksperymentalna analiza rozmieszczenia i liczebności*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1996, s. 639. ISBN 83-01-12041-X.
15. Kropiwek K., Szala M., Maciąg K., *Bioróżnorodność – wybrane zagadnienia*, Politechnika Lubelska, Lublin 2014.
16. Li Fan; Clausi David A., Wong A., *Comparative study of classification methods for surficial materials in the Umiujalik Lake region using RADARSAT-2 polarimetric, Landsat-7 imagery and DEM data*. "Canadian Journal of Remote Sensing", Vol. 41, No. 1, 2015, 29–39, DOI: 10.1080/07038992.2015.1035778.
17. Loroeh L., Rams L., *Infrastruktura badawcza oraz struktura organizacyjna Centrum Technologii Kosmicznych Instytutu Lotnictwa*, Prace Instytutu Lotnictwa, 234, 2014(1), 17–24.
18. Lyon R., Hubel P., *Eyeing the Camera: Into the Next Century*, 10th Color and Imaging Conference Final Program and Proceedings, 2002, 349–355.
19. Molder A., Bernhardt-Romermann M., Schmidt W., *Herb-layer diversity in deciduous forests: Raised by tree richness*

- or beaten by beech?, "Forest Ecology and Management" 2008 (256), 272–281.
20. Mora C., et al., *Land Cover Classification Using High-Resolution Aerial Photography in Adventdalen, Svalbard*. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography 97.3 (2015): 473–488.
 21. Nasiłowska S. i in., „European Journal of Remote Sensing”, 2017 (publikacja złożona do recenzji).
 22. Natya S., Rehna V.J., *Land Cover Classification Schemes Using Remote Sensing Images: A Recent Survey*, "British Journal of Applied Science & Technology", 2016 13(4): 1–11,
 23. Pielou E., *Shannon's Formula as a Measure of Specific Diversity: Its Use and Misuse*. The American Naturalist, 100(914), (1966). 463–465.
 24. Pimentel D., *The economics of invasive*, Ecological Economics 2005 (52), 273–268
 25. Prusinkiewicz Z., *Gleba jako zasadniczy składnik siedliska leśnego*, Sylwan, 08/09, 1970, 26–30.
 26. Rodarmel Craig, Jie Shan, *Principal component analysis for hyperspectral image classification*. "Surveying and Land Information Science", 62.2 (2002): 115.
 27. Shisanya C., Recha C., Anyamba A., *Rainfall variability and its impact on Normalized Difference Vegetation Index in arid and semi-arid lands of Kenya*. International Journal of Geosciences, 2011, 2, 36–41.
 28. Sienkiewicz J., *Koncepcje bioróżnorodności – ich wymiary i miary w świetle literatury*, "Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych", 2010 (45), 7–29.
 29. Tilman D., Reich P., Isbell F., *Biodiversity impacts ecosystem productivity as much as resources, disturbance, or herbivory*, Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012 (109), 10394–10397.
 30. Wilson E., *Różnorodność życia*. PWN, Warszawa 1999.
 31. Wiśniowski W., XX lat programu samolotów lekkich i bezpieczeństwa (PSLIB), Prace Instytutu Lotnictwa, 3 (236), 2014, 7–25.

Species diversity of forest stands estimation algorithm using RGB images of the tree crowns

Abstract: Global measurement of ecosystems species diversity is one of the fundamental postulates in natural habitats healthiness and usefulness protection. In the article an algorithm to estimate the Shannon-Wiener forest stands biodiversity indicator has been proposed. The algorithm includes statistical analysis (PCA) and classification methodology (ISOCCLASS) for simple RGB images. Getting RGB images does not require the use of expensive hardware. Taking into account the sunlight conditions RGB images can be useful in the continuous forest stands monitoring. In August 2016 an attempt was made to estimate the diversity of the trees in the "Młochowski Grad" nature reserve using proposed in this article algorithm. Using camera integrated with a Microsoft Lumia 550 smartphone 24 images of trees crowns were acquired in the all six reserve forest stands. In the one stand with the highest crowns diversity the algorithms result does not agree with Forest Data Bank in-situ estimation. In the other five stands the results were consistent with the data in the Forest Data Bank (Pearson correlation index = 0.967).

Keywords: biodiversity, algorithmic, PCA, remote sensing, classification, ISOCCLASS, forestry

Jan Kotlarz

jan.kotlarz@ilot.edu.pl

Studiuje astronomię na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Od 2012 roku pracuje w Zakładzie Teledetekcji Instytutu Lotnictwa. W 2009 r. został nominowany do nagrody Travelery przez National Geographic w kategorii naukowe osiągnięcie roku za stworzenie algorytmu generującego trójwymiarowe modele powierzchni Marsa na podstawie analiz topologicznych. Od 2013 r. kieruje projektem HESOFF.



Mariusz Kacprzak

Mariusz.Kacprzak@ilot.edu.pl

Absolwent Politechniki Warszawskiej, podczas wymiany studenckiej uczestniczył w zajęciach na Uniwersytecie Technicznym w Wiedniu (TU Wien). Od 2013 r. pracuje w Instytucie Lotnictwa, gdzie zajmuje się pozyskiwaniem i przetwarzaniem zdjęć lotniczych. Jego zainteresowania naukowe dotyczą praktycznego wykorzystania zdalnie sterowanych statków powietrznych (ang. RPAS, UAV).

