

KRZYSZTOF BĘDKOWSKI

Zastosowanie taksonomicznej analizy danych lotniczego skanowania laserowego do rozpoznania pionowej struktury drzewostanu i jej przestrzennej zmienności*

Taxonomic analysis of airborne laser scanning data for the recognition of stand vertical structure and its spatial variability

ABSTRACT

Będkowski K. 2020. Zastosowanie taksonomicznej analizy danych lotniczego skanowania laserowego do rozpoznania pionowej struktury drzewostanu i jej przestrzennej zmienności. Sylwan 164 (10): 805-819. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2020087>.

The aim of the research was to develop and verify the usefulness of the algorithm for grouping multi-feature objects known as Ward's taxonomic method for distinguishing homogeneous spatial structures in a forest stands. Scots pine forest stand (20.137720 E, 51.754974 N) was divided into 10 zones differing in the share of undergrowth and up-growth of deciduous species, and the presence of single oak trees growing to the upper layer. The LiDAR data obtained in the first days of May 2007 was used. 459 sample plots of a radius of $R=11.28$ m located in a 20×20 m grid were set up in the study area. Histograms of spatial distribution of airborne laser scanning pulses were made for them. The histograms are described using eight variables: (1) height above ground level of the highest point of reflection of the laser pulse, (2) height above the upper maximum of the histogram, (3) height above ground level of the lower maximum of the histogram, (4) share of pulses reflected in the upper maximum of the histogram in the total number of pulses, (5) share of pulses in the area of the lower maximum of the histogram in the total number of pulses, (6) share of pulses of the first histogram layer in the total number of pulses, (7) share of pulses in the lower layers of the histogram (from layer no. 2 to no. 11, i.e. from 0.5 to 5.5 m) in the total number of pulses in layers 1-11, i.e. from 0 to 5.5 m, as well as (8) average height above ground of the reflection places of all pulses. The measure of the similarity of the extracted structures was the Euclidean distance of the points representing the histograms in the multidimensional feature space. The results of the division (segmentation) of forest space using the Ward's method into 2 to 9 groups were analysed. It was found that the obtained divisions are related to the tree stand zones distinguished during the inventory carried out in the field. The proposed taxonomic method of LiDAR data analysis allows for the identification of homogeneous spatial structures in forest stands.

KEY WORDS

Pinus sylvestris, forest stand, spatial structure, segmentation, taxonomic analysis, LiDAR

*W pracy wykorzystano dane uzyskane w ramach projektu badawczego 2 P06L 02229 „Zastosowanie lotniczego i naziemnego skaningu laserowego w analizie struktury przestrzennej i funkcjonowania lasów w krajobrazie” prowadzonego przez autora w latach 2005-2007 na Wydziale Leśnym SGGW w Warszawie.

ADDRESSES

Krzysztof Będkowski – e-mail: krzysztof.bedkowski@geo.uni.lodz.pl

Wydział Nauk Geograficznych, Uniwersytet Łódzki; ul. Kopcińskiego 31, 90-142 Łódź

Wstęp

Pojęcie struktury lasu w naukach leśnych ujmowane jest różnorodnie. Najczęściej wyraża sposób przestrzennego rozmieszczenia elementów tworzących las. W układzie pionowym roślinność leśna tworzy warstwy: drzewa, krzewy i młode drzewa (podszycie i podrost), roślinność zielną oraz mchy i porosty. Z powodu zmienności siedliska [Gil 1995] oraz działalności gospodarczej budowa pionowa lasu jest naturalnie zmienna także w układzie poziomym. Ograniczenie rębni zupełnych na korzyść bardziej złożonych zwiększa przestrzenną różnorodność lasu. Wyodrębniane w ramach prac urządzania lasu jednostki przestrzenne (wydzielenia) nie są zatem jednorodne pod względem budowy pionowej i poziomej. Ze względów praktycznych, np. logistycznych i hodowlanych, nie mogą być zbyt małe, więc dosyć często obejmują fragmenty lasu istotnie różniące się wieloma cechami taksacyjnymi drzewostanu (wysokość drzew, zagęszczenie, zwarcie), a także obecnością lub brakiem innych warstw. Stosowany system opisu lasu odnosi większość cech do całego wydzielenia, pozwalając jedynie na wzmiankowanie o lokalnych odstępstwach.

Dokładniejsze poznanie przestrzennej budowy lasu ma duże znaczenie w związku z dynamicznym rozwojem wielu działów wiedzy leśnej i praktyki gospodarczej, ale także poza leśnictwem – w różnorodnych badaniach ekologicznych [Mücke, Hermann 2010]. Analiza przestrzenna budowy lasów naturalnych i gospodarczych znajduje się w obszarze zainteresowania leśników od dawna [Pancer-Kotejowa, Szwagrzyk 1997; Szwagrzyk i in. 1997; Świąć 1997; Bolibok 2003; Franklin, Van Pelt 2004; Brzeziecki 2005; Szmyt, Ceitel 2011; Sławski 2012], gdyż oczekuje się, że może wiele wnieść do poznania funkcjonowania lasu, zjawisk konkurencji, zróżnicowania gatunkowego, przestrzennego, a także wymiarowego. Wielu autorów wskazuje na konieczność znacznego poszerzenia zakresu pomiarów przestrzeni leśnej o cechy pozwalające na ocenę bioróżnorodności, produkcji biomasy, możliwości użytkowania rekreacyjnego lasów, ich roli w krajobrazie i wielu innych. Poszerzają one wiedzę o funkcjonowaniu ekosystemów leśnych, ale też mogą mieć wyraźne bezpośrednie znaczenie praktyczne, np. dla potrzeb oceny stopnia zagrożenia pożarowego albo raportowania o zasobach zgromadzonego węgla [Paschalis-Jakubowicz 2007].

Niezbędne jest opracowanie nowych metodyk zbierania i przetwarzania informacji o lesie. W tym kontekście należy umieścić np. koncepcję zastosowania w leśnictwie rastrowego modelu danych [Kamińska 2000; Będkowski 2011] czy np. używania fraktali jako narzędzia do opisu złożoności przestrzeni leśnej [Tracz i in. 2011]. Z teoretycznego i praktycznego punktu widzenia, dzięki rozwojowi informatyki, pomysł gromadzenia danych o lesie dla jednostek sprowadzonych do rastrów (o różnej wielkości i kształcie, w zależności od zapisywanej cechy) jest możliwy do realizacji. Współcześnie leśnictwo korzysta bowiem coraz częściej z technik oraz metod fotogrametrii i teledetekcji [Zawiła-Niedźwiecki, Zasada 2008]. Szczególnie skanowanie laserowe (skaning, inaczej LiDAR) pozwala na określenie wielu istotnych cech lasu z dużą dokładnością, na dużych obszarach i w stosunkowo krótkim czasie. Możliwe jest zatem poznanie zróżnicowanej przestrzennej budowy także wewnątrz poszczególnych wydzieleni. Technika skanowania laserowego pomyślana była przede wszystkim jako narzędzie do poznawania ukształtowania terenu wraz z budynkami i budowlami. Roślinność była postrzegana jako czynnik utrudniający pomiary i wiele uwagi poświęcono ocenie jej wpływu na uzyskiwaną dokładność i wypracowaniu odpowiednich

algorytmów filtrujących [Kraus, Pfeifer 1998; Kraus 2003; Pfeifer 2003; Pfeifer i in. 2004; Hyyppä i in. 2005; Będkowski, Stereńczak 2010]. Leśnicy i przyrodnicy wcześniej dostrzegli potencjał zastosowania skanowania laserowego do określania różnorodnych cech roślinności. Numeryczne modele terenu (NMT), modele pokrycia terenu (NMPT) oraz tzw. chmury punktów skanowania laserowego (lotniczego i naziemnego) są źródłem informacji przede wszystkim o wysokości roślinności, wielkości koron, zwarcium i liczbie drzew. Mogą być także wykorzystane, razem z danymi obrazowymi, do określania składu gatunkowego oraz wielkości zapasu [Riano i in. 2004; Abraham, Adolt 2006; Maltamo i in. 2006; Tickle i in. 2006; Stereńczak i in. 2008; Morsdorf 2011; Schmidtke i in. 2011; Gendek i in. 2018; Hawryło, Wężyk 2018]. Uzyskiwana dokładność wyznaczania cech drzew i drzewostanów nie ustępuje dotychczas stosowanym metodom i może być zaakceptowana także w naszym leśnictwie [Zawiła-Niedźwiecki i in. 2008; Zawiła-Niedźwiecki, Zasada 2008]. Struktura pionowa warstwy koron lub całego pionowego profilu drzewostanu jest cechą, do której pomiaru oraz analizy skanowanie laserowe jest szczególnie przydatne. Ze względu na właściwość przenikania impulsów laserowych do najgłębszych warstw drzewostanu technika ta poszerza znacznie możliwości badawcze w stosunku do stosowanych od dawna w leśnictwie danych obrazowych lotniczych i satelitarnych, ograniczonych w zasadzie do powierzchni warstwy koron [Lefsky i in. 2002; Lee i in. 2004; Parker, Russ 2004; Chasmer i in. 2006; Sherrill i in. 2008; Yunsheng i in. 2008; Cao, Dean 2011; Fidalgo-González i in. 2019; Sačkov i in. 2019], przy czym proponuje się także integrację danych skanowania laserowego i lotniczego [Pretzsch i in. 2011; Pearsea i in. 2018]. Strukturę pionową drzewostanów można analizować za pomocą histogramów, które przedstawiają punktowe rozkłady miejsc odbicia impulsów skanowania laserowego w poszczególnych warstwach drzewostanu. Badania koncentrują się głównie na wybranych fragmentach drzewostanów, tj. powierzchniach próbnych [Harding i in. 2001; Parker, Russ 2004; Goodwin i in. 2006; Maltamo i in. 2006; Antonarakis i in. 2008; Będkowski, Stereńczak 2008; Höfle i in. 2008; Pascual i in. 2008; Myszkowski, Ksepko 2010; Będkowski 2011]. Znacznie mniej uwagi poświęcono problemowi zmienności cech chmur punktów skanowania laserowego na obszarze całego drzewostanu [Pascual i in. 2008; Będkowski, Zarzecka 2011; Zarzecka, Będkowski 2012; Ayrey i in. 2019]. Do poszukiwania struktur podobnych do siebie (które Stereńczak i in. [2018] nazywają homogenous patches i proponują uwzględnienie obok danych skanowania także wyników inwentaryzacji naziemnej) oraz do ich segmentacji [van Aardt i in. 2008; Höfle i in. 2008; Latifi i in. 2016] proponuje się m.in. metody znane jako klasyfikacja obiektowa OBIA (Object-Based Image Analysis) [van Aardt i in. 2008; Antonarakis i in. 2008; Osberger 2010]. Badania takie są niezbędne, aby wykazać, na ile cechy rozkładów chmur punktów skanowania laserowego mogą być wykorzystane do wyszukiwania fragmentów istotnie różniących się lub przeciwnie – podobnych do siebie pod względem budowy przestrzennej (pionowej i poziomej), co pozwoliłoby np. stwierdzić obecność oraz stan dolnych warstw drzewostanu.

Celem pracy było opracowanie i sprawdzenie przydatności algorytmu grupowania obiektów wielocechowych, znanego jako taksonomiczna metoda Warda, do wyróżniania homogenicznych struktur przestrzennych w drzewostanach. Podstawowym źródłem danych są histogramy przestrzennych rozkładów impulsów lotniczego skanowania laserowego opisane za pomocą specjalnie dobranych cech. Miarą podobieństwa wyodrębnianych struktur jest odległość punktów reprezentujących histogramy w wielowymiarowej przestrzeni cech.

Materiał i metody

Badania dotyczą trzech drzewostanów położonych w północno-wschodnim fragmencie uroczyska Głuchów (20,137720 E, 51,754974 N). O wyborze obiektu zdecydowały dostępność danych ska-

nowania laserowego, gatunek główny (sosna) oraz wyraźna przestrzenna zmienność budowy pionowej drzewostanów. Według Planu... [1999] drzewostany są pochodzenia sztucznego, częściowo naturalnego. W części wschodniej drzewostan 204a rośnie na siedlisku boru świeżego i składa się z sosny (w wieku 68 lat w 1999 roku), z pojedynczą domieszką dębu i brzozy (40 lat), zwarcie jest pełne, przeciętna pierśnica $D_{1,3}=25$ cm, wysokość $h=19$ m, zapas grubizny wynosi 281 m³/ha. Brak jest informacji o podroście i podszycie, pokrywa jest zazieleniona (czernica, płonnik). Część centralną zajmuje drzewostan 204b, również na siedlisku boru świeżego, sosna (54 lata), pojedynczo brzoza, dąb (54 lata) oraz sosna w wieku 105 lat, zwarcie jest pełne, $D_{1,3}=18$ cm, $h=17$ m, zapas grubizny wynosi 205 m³/ha. Podrost stanowią w 80% dąb i w 20% brzoza (20 lat) oraz z podsadzenia buk i dąb (7 lat). Brak informacji o podszycie, pokrywa jest mszysta (płonnik, czernica, brusznica, trzcinnik). Zachodnia część badanego obszaru to fragment drzewostanu 205a na siedlisku boru mieszanego świeżego, składający się w 80% z sosny (54 lata, $D_{1,3}=18$ cm, $h=17$ m, grubizna 164 m³/ha) oraz w 20% z brzozy (54 lata, $D_{1,3}=26$ cm, $h=20$ m, grubizna 41 m³/ha), zwarcie jest pełne. Podrost składa się w 60% z buka i w 40% z dębu (8 lat), jest uzupełniony tymi gatunkami także przez podsadzenie. Nalot stanowi 3-letnia sosna. Na 30% powierzchni występuje podszyt (kruszyzna, jarząb, dąb, brzoza, osika) i pokrywa zazieleniona (orlica, czernica, trzcinnik, jeżyna).

Dwóch obserwatorów, pracujących niezależnie i w różnych terminach, dokonało podziału przestrzeni wybranego do badań obszaru na strefy różniące się udziałem w drzewostanie podszytu i podrostu gatunków liściastych oraz obecnością pojedynczych drzew dębu wrastających do piętra górnego. Pod uwagę brano oszacowane wizualnie stopień pokrycia terenu przez warstwę podszytu i/lub podrostu oraz ich wysokość w postaci ułamka wysokości drzewostanu głównego. Wydzielono także strefy całkowicie pozbawione podszytu i podrostu. Łącznie wyróżniono 10 stref (A-J), z których niektóre są podzielone na oderwane mniejsze jednostki przestrzenne (tab., ryc. 1). Granice stref wyznaczono poprzez pomiar współrzędnych punktów charakterystycznych za pomocą geodezyjnego odbiornika nawigacji satelitarnej (GNSS) o dużej dokładności.

Jakość siedliska, a z nią skład i wysokość drzewostanu oraz skład, wysokość i pokrycie terenu przez podrost i podszyt zmieniają się wyraźnie od południowej części badanego obszaru w kierunkach na północny-zachód, północ i północny-wschód. Część granic wyróżnionych stref jest w terenie wyraźnie zaznaczona (dotyczy to głównie stref A, B, G i H). Granice między strefami C, E i F, a także D i I są mniej czytelne.

W badaniach wykorzystano dane skanowania laserowego (LiDAR) uzyskane podczas nalołów wykonanych w dniach 2-3 maja 2007 roku za pomocą skanera Falcon II – przy długości fali 1560 nm, średnicy plamki na poziomie terenu około 0,7 m [Będkowski, Stereńczak 2008]. Rejestrowano pierwsze i ostatnie odbicia impulsów laserowych. Osie nalołów były zorientowane w kierunku północ-południe, samolot przelatywał na wysokości około 700 m nad poziomem terenu. Poszczególne pasy skanowania miały szerokość około 250 m. Gęstość skanowania wynosiła do 10 zarejestrowanych odbić impulsów na 1 m². Do dalszej analizy wybrano odbicia impulsów laserowych z pierwszego echa. Jak stwierdzono podczas wizji terenowej, gatunki liściaste znajdujące się głównie w dolnych warstwach drzewostanu miały już w chwili skanowania znacznie rozwinięty aparat asymilacyjny.

Z chmur zarejestrowanych impulsów laserowych wybrano za pomocą autorskiego oprogramowania impulsy, których współrzędne X, Y wypadały w granicach kołowych powierzchni próbnych o promieniu $R=11,28$ m (400 m²). Odległość między środkami powierzchni wynosiła 20 m. Po dostosowaniu siatki do granic drzewostanów wybrano do dalszej analizy 459 powierzchni, których reprezentację w siatce 20×20 m przedstawiono na rycinie 3. Ze względu na znaczne

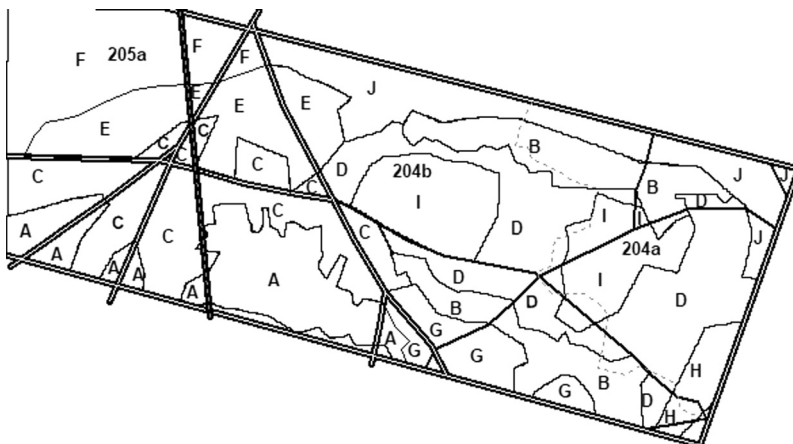
Tabela.

Położenie i cechy charakterystyczne stref wyróżnionych w badanych drzewostanach
 Location (Położenie) and characteristic features (Cechy charakterystyczne) of zones distinguished in the studied stands

Położenie	Cechy charakterystyczne
A Trzy rozłączne obszary w części południowo-zachodniej Three separate areas in the south-west	W drzewostanie głównym sosna, zwarcie umiarkowane, brak gatunków liściastych. Drzewa najniższe z całego badanego obszaru. Zupełny brak podszytu i podrostu. Pokrywa mszysta, miejscami martwa. Pine in the main stand, moderate stand density, no deciduous species. The lowest trees from the entire studied area. Complete lack of undergrowth and up-growth. Soil covered with moss or dead in places.
B Dwa rozłączne obszary w części wschodniej Two separate areas in the eastern part	Sosna, pojedynczo dąb, rzadziej brzoza, zwarcie pełne i umiarkowane. W podszytynie (wysokość do 0,5 m, pokrycie $\leq 5\%$) dąb, kruszyna, osika, jałowiec. Pokrywa zazieleniona (czernica, brusznica, trawy, mchy). Pine with single oaks, less often birch, full and moderate stand density. Undergrowth (height up to 0.5 m, coverage $\leq 5\%$): oak, alder buckthorn, aspen, juniper. Soil with green cover (blueberry, cowberry, grasses, mosses).
C Zwarty obszar w części zachodniej Compact area in the western part	Sosna, pojedynczo dąb, zwarcie pełne i umiarkowane. Podszyt i podrost składają się głównie z buka z domieszką dębów – bezszypułkowego i czerwonego, sięgają do $\frac{1}{5}$ - $\frac{1}{4}$ wysokości drzewostanu i pokrywają około 80% powierzchni. Pokrywa zazieleniona (jw.). Pine with single oaks, full and moderate stand density. The undergrowth and up-growth consist mainly of beech and admixture of oaks – sessile and red, reach up to $\frac{1}{5}$ - $\frac{1}{4}$ of the height of the main stand and cover about 80% of the area. Soil with green cover (as above).
D W części centralnej i wschodniej In the central and eastern part	Sosna, pojedynczo dąb i brzoza, zwarcie pełne. Podszyt i podrost wysokość do około 5 m, pokrywają teren w około 50%. W podszytynie kruszyna, jałowiec. Pokrywa: czernica, brusznica, trawy. Pine with single oaks and birch, full density. Undergrowth and up-growth up to ca 5 m, cover the area in approximately 50%. Undergrowth: buckthorn, juniper. Soil cover: blueberry, cowberry, grasses.
E Zwarty obszar w części zachodniej Compact area in the western part	Podobnie jak w strefie C: sosna, pojedynczo dąb, zwarcie pełne i umiarkowane. Podszyt i podrost składają się głównie z buka z domieszką dębów – bezszypułkowego i czerwonego, które sięgają do $\frac{1}{2}$ wysokości drzewostanu i pokrywają 100% powierzchni. Pokrywa zazieleniona. As in zone C: pine with single oaks, full and moderate stand density. The undergrowth and up-growth consist mainly of beech and admixture of oaks – sessile and red, which reach up to $\frac{1}{2}$ the height of the stand and cover 100% of the area. The soil cover is green.
F W części północno-zachodniej In the north-west part	W drzewostanie 80% sosna, 20% brzoza, pojedynczo dąb. Najbardziej z całego badanego obszaru rozwinięte podrost i podszyt buka i dębu (pokrycie 100% i wysokość powyżej $\frac{1}{3}$ do $\frac{3}{4}$ wysokości drzewostanu). Pokrywa zazieleniona. In the stand 80% pine, 20% birch, single oaks. Beech and oak undergrowth and up-growth are the most developed in the entire study area (100% coverage and height above $\frac{1}{3}$ to $\frac{3}{4}$ of the stand height). Soil with green cover.
G Dwa nieduże obszary w części południowej Two small areas in the southern part	Sosna, pojedynczo dąb. Podrost dębu pokrywa około 80% terenu i sięga do $\frac{1}{2}$ wysokości drzewostanu. W podszytynie jałowiec, dąb. Pokrywa zazieleniona. Pine with single oaks. The oak up-growth covers about 80% of the area and reaches up to $\frac{1}{2}$ of the stand height. Undergrowth: juniper and oak. The soil cover is green.

Tabela c.d.

Położenie	Cechy charakterystyczne
H W części południowo-wschodniej In the south-east part	Sosna. W podroście, bardzo wyraźnie oddzielnym od sosny, gęsty dąb – sięga do około $\frac{1}{3}$ wysokości drzewostanu (8 m). Pokrywa zazieleniona. Pine. In the up-growth, very clearly separated from the pine tree, a dense oak – reaches up to $\frac{1}{3}$ of the stand's height (8 m). The soil cover is green.
I Dwa obszary w części wschodniej Two areas in the eastern part	Sosna z dosyć licznymi egzemplarzami dębu bezszypułkowego. Podrost i podszyt pokrywają teren w około 80%: dąb, brzoza, kruszyna, jałowiec – w większości około 2,5 m wysokości, sporadycznie do $\frac{1}{4}$ wysokości drzewostanu (około 5-6 m). Pokrywa zazieleniona (brusznica, czernica, trawy, mech). Pine with quite numerous examples of sessile oak. The undergrowth and up-growth cover the area in ca. 80%: oak, birch, buckthorn, juniper – mostly ca 2.5 m in high, occasionally up to $\frac{1}{4}$ of the height of the stand (approximately 5-6 m). Green cover (cowberry, blueberry, grass, moss).
J W części północnej In the northern part	Sosna, sporadycznie dąb, brzoza. Podrost dębu sięga do około $\frac{1}{2}$ wysokości drzewostanu i zajmuje około 80% powierzchni. Pokrywa zazieleniona. Pine with some oak, birch. The oak up-growth reaches approximately $\frac{1}{2}$ of the stand height and covers ca 80% of the area. The soil cover is green.



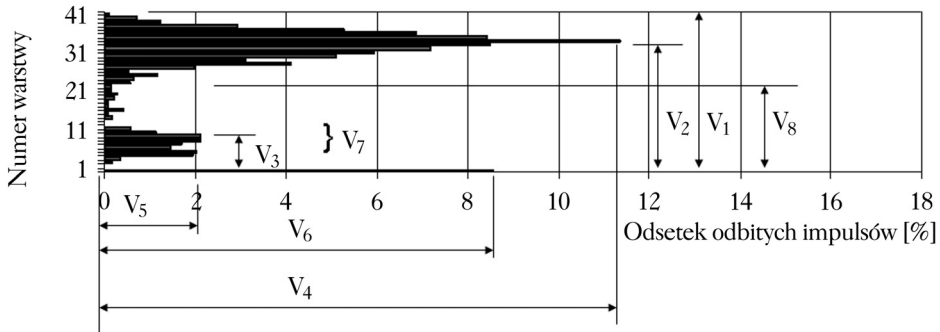
Ryc. 1.

Podział lasu na różniące się cechami budowy pionowej drzewostanu strefy wyznaczone podczas inwentaryzacji terenowej

Division of the forest into zones (solid thin lines), differing in the features of vertical structure, determined during the field inventory

linia przerywana – granica wydzieli 204a/204b, wydzielenie 205a jest w części zachodniej, linie ciągłe grube – drogi o szerokości do 2 m, linie ciągłe podwójne – linie podziału powierzchniowego i drogi o szerokości powyżej 2 m
dashed line – line dividing 204a and 204b compartments, compartment 205a is in the western part, continuous thick lines – roads up to 2 m wide, continuous double lines – compartment lines and roads wider than 2 m

pokrywanie się pasów skanowania niektóre fragmenty lasu były skanowane trzykrotnie. W takich przypadkach wybrano dane pochodzące z tego pasa skanowania, którego oś była położona najbliżej danej powierzchni próbnej. Dzięki temu wybierano wariant, w którym promienie laserowe łatwiej przenikały przez okap drzewostanu. Chmury punktów skanowania laserowego poddano także normalizacji, która polegała na przypisaniu każdemu punktowi wysokości nad poziomem terenu. W tym celu od zarejestrowanej podczas skanowania rzędnej punktów odejmowano odpowiednią rzędną numerycznego modelu terenu (NMT) o rozdzielczości przestrzennej 1 m,



Ryc. 2.

Cechy opisujące kształty histogramów

Features describing the shapes of histograms

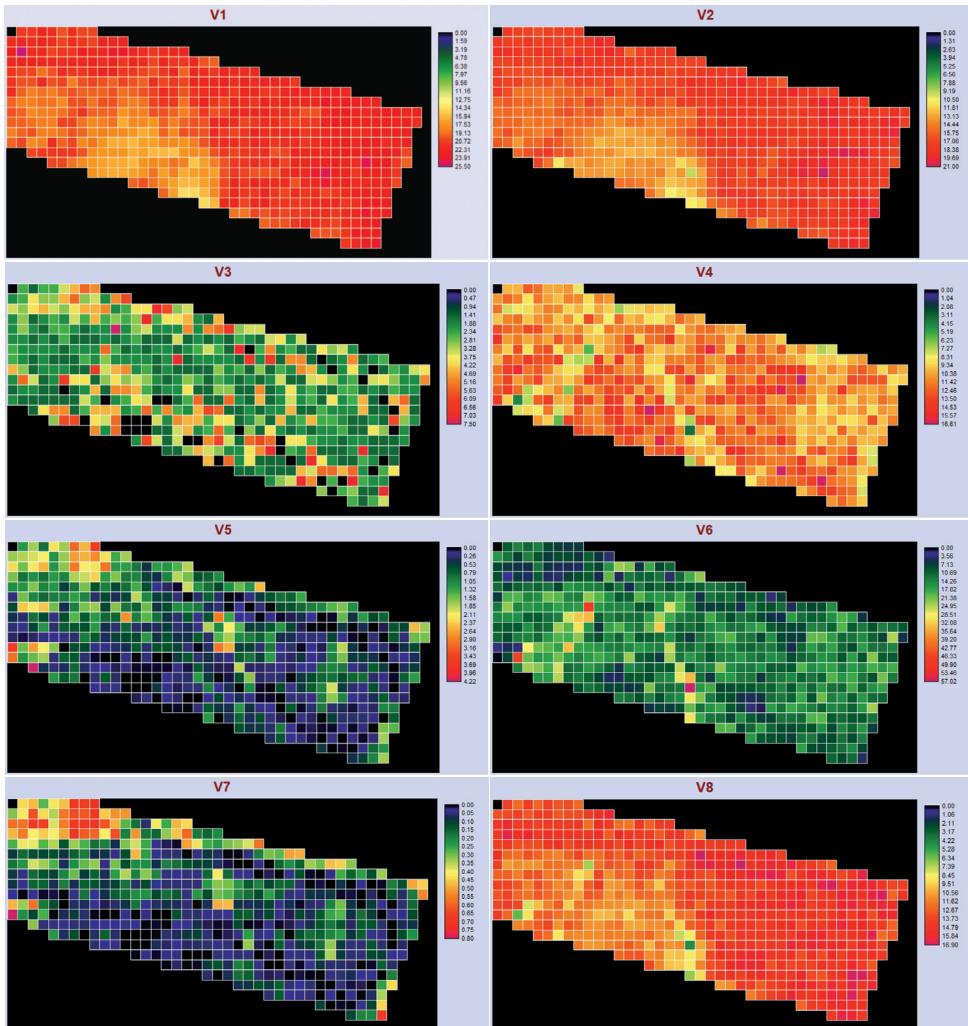
V_1 – wysokość [m] nad poziomem terenu (n.p.t.) najwyższego położonego miejsca odbicia impulsu laserowego, V_2 – wysokość [m] n.p.t. górnego maksimum histogramu, V_3 – wysokość [m] n.p.t. dolnego maksimum histogramu, V_4 – udział [%] impulsów odbitych w górnym maksimum histogramu w ogólnej liczbie impulsów, V_5 – udział [%] impulsów w rejonie dolnego maksimum histogramu w ogólnej liczbie impulsów, V_6 – udział [%] impulsów pierwszej (tj. najniższej położonej) warstwy histogramu w ogólnej liczbie impulsów, V_7 – udział [%] impulsów w dolnych warstwach histogramu (od nr 2 do nr 11, tj. od 0,5 do 5,5 m) w ogólnej liczbie impulsów w warstwach 1-11, tj. od 0 do 5,5 m, V_8 – średnia wysokość [m] n.p.t. miejsc odbić wszystkich impulsów

V_1 – height [m] above ground level of the highest point of reflection of the laser pulse, V_2 – height [m] above the upper maximum of the histogram, V_3 – height [m] above ground level of the lower maximum of the histogram, V_4 – share [%] of pulses reflected in the upper maximum of the histogram in the total number of pulses, V_5 – share [%] of pulses in the area of the lower maximum of the histogram in the total number of pulses, V_6 – share [%] of pulses of the first histogram layer in the total number of pulses, V_7 – share [%] of pulses in the lower layers of the histogram (from layer no. 2 to no. 11, i.e. from 0.5 to 5.5 m) in the total number of pulses in layers 1-11, i.e. from 0 to 5.5 m, V_8 – average height above ground [m] of the reflection places of all pulses

utworzonego z danych skanowania laserowego za pomocą oprogramowania TreesVis [Weinacker i in. 2004].

Dla każdej kołowej powierzchni próbnej wykonano histogramy pionowego rozkładu znormalizowanych punktów skanowania laserowego w warstwach o grubości 0,5 m. Pierwsza warstwa zawiera impulsy zarejestrowane na wysokości $0 \leq h \leq 0,5$ m nad poziomem terenu, następna $0,5 < h \leq 1,0$ m itd. Kształt histogramów opisano za pomocą 8 zmiennych (ryc. 2). Łatwo zauważyć, że zmienna V_1 oznacza maksymalną wysokość drzewostanu na danej powierzchni próbnej, na zmienne V_2 i V_4 wpływają zarówno gęstość koron, jak i zwarcie górnych warstw drzewostanu, natomiast zmienne V_3 , V_5 oraz V_7 mają związek z dolnymi warstwami drzewostanu – podszytu i podrostu. Na wielkość zmiennych V_6 i V_8 mają wpływ gęstość koron oraz zwarcie wszystkich warstw drzewostanu. Przestrzenny rozkład zmiennych, których wartości przypisano do kwadratowych oczek rastra o wielkości 20×20 m, przedstawiono na rycinie 3.

Przyjęto, że na pewnych obszarach budowa pionowa lasu ma podobne cechy – występują (lub nie) podszyt i podrost, które w podobnym stopniu pokrywają powierzchnię dna lasu i dorastają do określonej wysokości w drzewostanie, drzewostan główny tworzą drzewa o zbliżonej wysokości, wielkości i ażurowości koron, a także zwarcie i zagęszczeniu. Podobne pod względem wymienionych cech fragmenty drzewostanu powinny być odzwierciedlone w danych skanowania laserowego w postaci podobnych histogramów pionowego rozkładu chmur punktów laserowych, a zatem w przyjętych zmiennych V_1 - V_8 , reprezentujących fragmenty lasu podzielonego na siatkę pól o wymiarach 20×20 m. Problem badawczy polega na opracowaniu odpowiedniego sposobu wskazania wyróżniających się fragmentów lasu o podobnej budowie, wyrażonej w wartościach zmiennych opisujących kształty histogramów i połączeniu ich w większe przestrzenne grupy.



Ryc. 3.

Przestrzenny rozkład wartości analizowanych zmiennych opisujących kształty histogramów pionowych rozkładów miejsc odbić impulsów skanowania laserowego

Spatial distribution of the values of analysed variables describing the shapes of the histograms of the vertical distributions of the places of reflection of laser scanning pulses

Zadanie polega na grupowaniu (klasyfikacji i porządkowaniu) obiektów wielocechowych (tutaj pól siatki opisanych przez kilka zmiennych) i jest domeną metod taksonomicznych. Metody taksonomiczne są bardzo często wykorzystywane w ekonometrii, gdy zachodzi konieczność klasyfikowania obiektów (np. jednostek administracyjnych) ze względu na różne cechy opisujące ich potencjał gospodarczy. Wśród taksonomicznych metod klasyfikacji wyróżnia się np. metody hierarchiczne i niehierarchiczne, aglomeracyjne i podziałowe (tj. grupowania i podziału), obszarowe, optymalizacyjne i inne [Kolenda 2006]. Metody hierarchiczne polegają na tworzeniu skupień obiektów, które na kolejnych etapach są łączone w skupienia większe (metody aglomeracyjne) lub podlegają podziałowi na skupienia mniejsze (w metodach podziałowych). W pierwszym przypadku przyjmuje się na początku, że wszystkie obiekty są razem jednoobektowymi skupie-

niami, w drugim zaś, że jest to jedno skupienie składające się z wielu obiektów. Wspólną cechą metod taksonomicznych, podziałowych i aglomeracyjnych jest konieczność określenia liczby tworzonych grup obiektów. Nie można tu podać jednego ścisłego kryterium – o liczbie grup decydują zarówno przedmiot, jak i cel badań. Dostyc często eksperyment polega na testowaniu wyników uzyskanych przy przyjęciu kilku wariantów liczby grup.

W niniejszych badaniach testowano metodę taksonomiczną Warda, która jest hierarchiczna i aglomeracyjna [Kolenda 2006]. Podstawę obliczeń stanowi macierz V zawierająca wartości $c=8$ zmiennych (cech) V_1, V_2, \dots, V_8 opisujących $n=459$ obiektów, którymi są histogramy chmur punktów odbić impulsów laserowych. Każda ze zmiennych została poddana normalizacji poprzez przekształcenie liniowe:

$$V'_{c,d} = \left(\frac{V_{c,d} - V_{c,\min}}{V_{c,\max} - V_{c,\min}} \right) \quad [1]$$

gdzie:

- $V'_{c,d}$ – unormowana wartość cechy V_c i -tego obiektu,
- $V_{c,d}$ – wartość cechy V_c i -tego obiektu przed normalizacją,
- $V_{c,\min}, V_{c,\max}$ – minimalna i maksymalna wartość danej cechy.

Unormowane zmienne otrzymały wartości z przedziału (0, 1). Na ich podstawie wyznaczono macierz odległości D o wielkości $n \times n$ (gdzie n jest liczbą obiektów). Elementy macierzy D obliczono z wykorzystaniem tzw. odległości Minkowskiego:

$$d_{i,k} = \sqrt[p]{\sum_{j=1}^c |V'_{j,i} - V'_{j,k}|^p} \quad (i, k = 1, \dots, n; j = 1, \dots, c) \quad [2]$$

gdzie:

- $d_{i,k}$ – odległość między obiektami i oraz k ,
- $V'_{j,i}, V'_{j,k}$ – unormowana wartość cechy V_j obiektów i oraz k ,
- p – parametr metody (przyjęto $p=2$, zatem odległość $d_{i,k}$ jest tzw. odległością euklidesową).

Przebieg grupowania obiektów w metodzie Warda jest następujący:

1. Zbiór n obiektów traktowany jest na początku jako zbiór n odrębnych skupień.
2. W macierzy D wyszukuje się dwa skupienia p i q o najmniejszej odległości.
3. Znalezione skupienia tworzą jedno skupienie o numerze p , zmniejsza się liczbę skupień o 1 (tj. usuwa się skupienie q).
4. Oblicza się odległość d_{pr} nowego skupienia p do każdego z pozostałych skupień według wzorów [Kolenda 2006]:

$$d_{pr} = a_1 d_{pr} + a_2 d_{qr} + b d_{pq} \quad [3]$$

$$a_1 = \frac{n_p + n_r}{n_p + n_q + n_r} \quad [4]$$

$$a_2 = \frac{n_q + n_r}{n_p + n_q + n_r} \quad [5]$$

$$b = -\frac{n_r}{n_p + n_q + n_r} \quad [6]$$

gdzie:

- d_{pq} – odległość między łączonymi skupieniami p i q wyznaczona według wzoru 2,

d_{pr} – odległość między skupieniem p i skupieniem r (innym niż q),
 d_{qr} – odległość między skupieniem q i skupieniem r (innym niż p),
 n_p, n_q, n_r – liczebność skupień p, q, r .

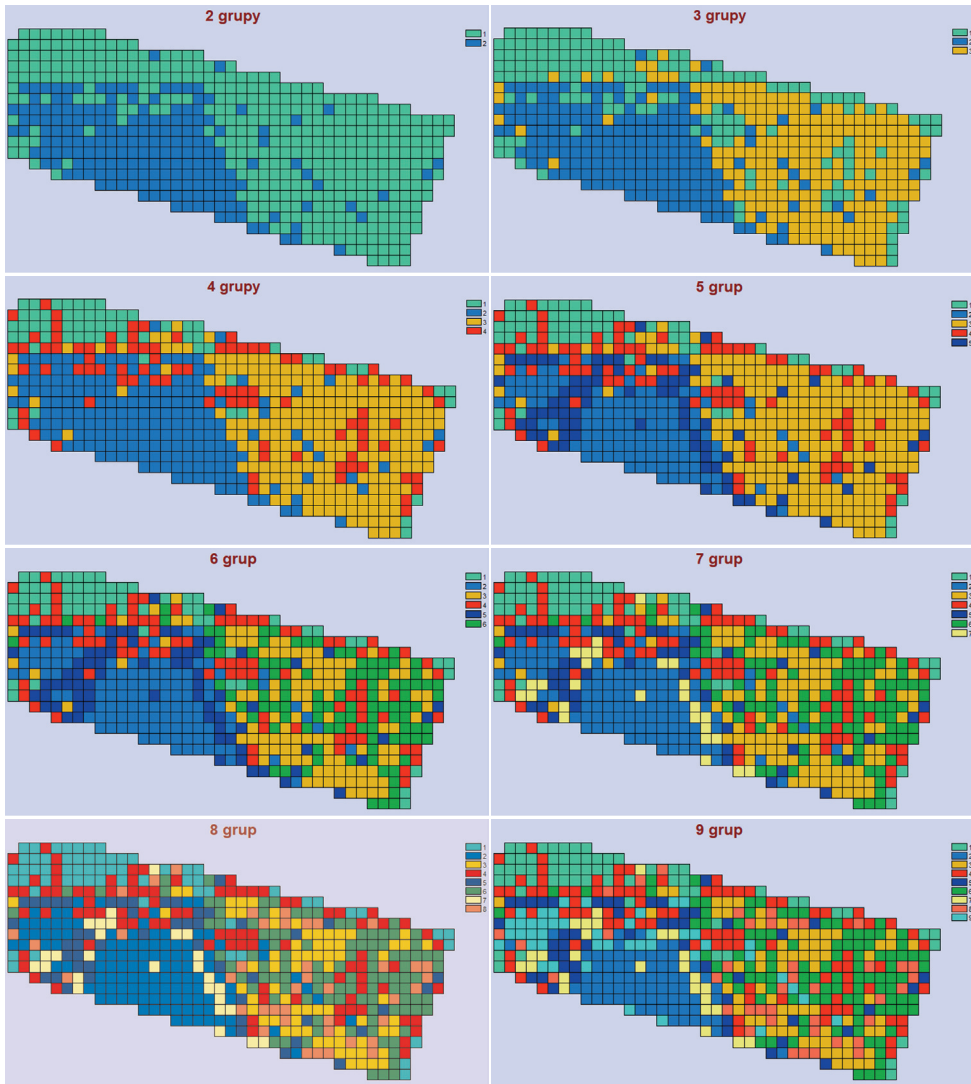
5. Kroki 1-4 są powtarzane iteracyjnie do momentu, w którym w całym zbiorze zostanie utworzona wymagana liczba skupień (jeśli ten parametr został zadany) lub do połączenia skupień w jedno skupienie obejmujące wszystkie obiekty.

Obliczenia zrealizowano za pomocą programu „Taksonomia numeryczna” opracowanego i udostępnionego przez Kolendę [2006].

Wyniki i dyskusja

Testowano podział zbioru histogramów metodą Warda na kolejno 2, 3, ..., 9 skupień (ryc. 4). Łatwo zauważyć, że jest to w istocie 9 końcowych etapów działania algorytmu, a uzyskiwane podziały polegają na stopniowym łączeniu skupień (istota metody hierarchicznej).

Wyznaczone za pomocą opisanych powyżej metod przestrzenne rozkłady powierzchni próbnych zaliczonych do grup o podobnych kształtach histogramów mogą być poddane analizie wizualnej, polegającej na ich porównaniu ze strukturami wyodrębnionymi w drzewostanie podczas wizji terenowej. Wszystkie zastosowane warianty grupowania histogramów (ryc. 4) doprowadziły do podziałów, które wydają się mieć związek z przestrzenną zmiennością struktury drzewostanów. Podział na dwie grupy ma wyraźny związek z wysokością drzewostanu, wysokością górnego maksimum histogramu oraz średnią wysokością miejsc odbić impulsów laserowych (ryc. 3, zmienne V_1, V_2, V_8). Ponadto w grupie nr 1 znajdują się drzewostany o złożonej budowie pionowej, natomiast grupę nr 2 stanowi część lasu pozbawiona podszytu i podrostu, z glebą pokrytą pokrywą mszystą. W miarę zwiększania liczby wyróżnionych grup taksonomicznych obraz ich powierzchniowego rozkładu staje się coraz bardziej złożony: przy podziale na 3 i 4 grupy wyodrębniły się dodatkowo obszary oznaczone w terenie jako B, D, E oraz I, które różnią się gęstością i pokryciem oraz wysokością dolnych warstw podszytu i podrostu drzewostanu. Znajduje to odbicie w przestrzennym rozkładzie zmiennych V_3, V_7 oraz V_6 histogramów. Od podziału na 5 grup i więcej zaznaczony jest także wpływ szerokich dróg – tutaj wyraźny jest związek wyniku podziału z cechami V_4 (niższy odsetek odbić impulsów w warstwie koron) i V_6 (zwiększony odsetek odbić impulsów na poziomie terenu). W tym przypadku obecność odbić impulsów na poziomie warstwy koron jest uzasadniona tym, że próba pobrana do wyznaczenia histogramu obejmuje zarówno drogę, jak i przyległy las. Spośród wszystkich analizowanych zmiennych trudno jest wizualnie wykazać wpływ na uzyskane wyniki zmiennej V_3 (wysokość nad poziomem terenu dolnego maksimum histogramu). Na rycinie 3 wyraźnie widoczne są miejsca, w których nie wykazano obecności tego maksimum – pokrywają się one z rejonami oznaczonymi w terenie (ryc. 1) jako A (brak podszytu i podrostu) oraz B (podszyt i podrost bardzo nieliczne i o wysokości do 0,5 m). Zwraca uwagę także fakt, że nie na całych obszarach A oraz B wykazano brak dolnego maksimum. Prawdopodobnie zaznaczył się wpływ impulsów odbitych od pni drzew. Ponadto wyznaczenie zmiennej V_3 było dosyć problematyczne, gdyż zastosowany autorski algorytm wyszukiwał dolne maksimum na zasadzie porównywania liczby impulsów zarejestrowanych w dolnych warstwach drzewostanu (do $1/2$ wysokości drzewostanu, bez warstwy najniższej 0-0,5 m, rejestrującej głównie odbicia na poziomie gruntu). W praktyce wystarczyło wykryć niewielką liczbę impulsów, aby stwierdzić występowanie warstwy drzewostanu identyfikowanej jako podszyt lub podrost. Natomiast w przypadku braku impulsów pojawił się problem związany z zapisaniem tego faktu w sposób „zrozumiały” dla algorytmu Warda, w którym wartość zero nie oznaczała braku zmien-



Ryc. 4.

Przestrzenny rozkład wyróżnionych za pomocą metody Warda grup histogramów opisujących pionową budowę lasu, w zależności od przyjętej w metodzie liczby grup (2 do 9)

Spatial distribution of the groups of histograms describing the vertical structure of the forest distinguished using the Ward's method, depending on the number of groups adopted in the method (2 to 9)

nej V_3 , lecz realną wartość, umiejscawiając ją w określonym miejscu układu współrzędnych zmiennej V_1 - V_8 . Inaczej mówiąc: czym innym jest brak maksimum, a czym innym wskazanie jego obecności na poziomie najniższej warstwy. Problemy te będą wymagały rozwiązania w ewentualnych dalszych badaniach.

Można postulować dobór dalszych zmiennych opisujących kształty histogramów, które byłyby wiązane np. z wysokością podstawy koron drzew pierwszego piętra – cechą ważną, ponieważ razem ze zmienną V_1 opisuje długość koron drzew, która decyduje o przyroście miąższości drzew, a także o jakości ich strzał [Żybuła 1977]. Bardziej wskazane byłoby też ustalenie

wysokości piętra dolnego, a nie miejsca, w którym występuje drugie (tj. dolne) maksimum odbić impulsów laserowych. Rozważyć można także, czy wszystkie zmienne opisujące histogramy są równie ważne w procesie podziału przestrzeni lasu, co jednakże wymagałoby przyjęcia innego mechanizmu wyszukiwania homogenicznych stref niż zastosowany w niniejszej pracy. Osobnych analiz wymaga zagadnienie wielkości siatki rastra, gdyż może mieć ona zapewne znaczenie także dla dokładności wyznaczenia wartości przyjętych cech opisujących histogramy (jak wynika choćby z prac dotyczących zmienności pierścnicowego pola przekroju i miąższości drzew [Meixner i in. 1997a, b]).

Należy wskazać także na pewne ograniczenia metod taksonomicznych (hierarchicznych, zarówno aglomeracyjnych, jak i podziałowych). Umożliwiają one wykonanie podziału każdego zbioru obiektów, a więc nawet takiego, w którym wewnętrzne struktury przestrzennego rozkładu obiektów w przestrzeni wielowymiarowej opisujących je cech nie są wyraźnie widoczne. Wystarczy niewielka, matematycznie stwierdzona różnica odległości między obiektami, aby zostały one w określony sposób połączone (lub podzielone w metodach podziałowych). Istnieją wprawdzie kryteria oceny mocy powiązań na poszczególnych etapach realizacji algorytmu, jednak obecnie brak jest zasad ich interpretacji przy wyodrębnianiu struktur w drzewostanie. Uzyskiwane wyniki są także silnie uzależnione od początkowego składu obiektów. W praktyce oznacza to, że dołączenie do analizowanego obszaru nowego (choćby sąsiedniego) fragmentu lasu może doprowadzić do wyodrębnienia innych stref. Jest to zjawisko podobne do tego, z którym należy się liczyć w teledetekcji przy nienadzorowanej klasyfikacji treści obrazów, gdzie można zauważyć różnice wyników uzyskanych dla oddzielnie klasyfikowanych obrazów i obrazów złożonych w większe obszarowo zespoły. Nie bez znaczenia jest także złożoność obliczeniowa algorytmu klasyfikacyjnego. Przy podziale lasu na fragmenty o wielkości około 0,04 ha uzyskuje się dużą liczbę obiektów, dla których należy wyznaczyć macierz odległości o wielkości wprost proporcjonalnej do kwadratu liczby obiektów. Zastosowany program musi operować na bardzo dużych zbiorach danych, co znacznie wydłuża czas obliczeń.

Wnioski

- ✦ Zaproponowana metoda taksonomiczna analizy danych skanowania laserowego (LiDAR) pozwala na wyodrębnianie struktur przestrzennych w drzewostanach.
- ✦ Należy starannie przeanalizować i odpowiednio dobrać do ewentualnych dalszych badań zmienne opisujące kształty histogramów, tj. przestrzenne rozkłady miejsc odbić impulsów laserowych, w tym definicje wyznaczania tych zmiennych w używanych algorytmach.
- ✦ Zastosowana w badaniach wielkość powierzchni próbnej ($R=11,28$ m) oraz jej kształt znajdują wprawdzie uzasadnienie w zasadach przyjętych w praktyce badań lasu, jednak mogą być przedmiotem oddzielnych analiz.
- ✦ Z uwagi na właściwości i ograniczenia metody wskazane jest opracowanie zaleceń co do wielkości obszaru, dla którego jej stosowanie będzie efektywne zarówno pod względem złożoności obliczeniowej, jak i uzyskiwanych wyników podziału przestrzeni leśnej.
- ✦ Warto zwrócić uwagę na inne metod taksonomiczne, w tym szczególnie niehierarchiczne, w których podział obiektów na różną o 1 liczbę skupień prowadzi do zmian całej struktury, a nie tylko podziału jednego skupienia.

Podziękowania

Autor dziękuje panu Michałowi Piórkowskiemu, studentowi Wydziału Leśnego SGGW w Warszawie, za uczestnictwo w części prac terenowych prowadzących do podziału analizowanego obszaru lasu na fragmenty różniące się budową przestrzenną.

Literatura

- van Aardt J. A. N., Wynne R. H., Scrivani J. A. 2008. Lidar-based Mapping of Forest Volume and Biomass by Taxonomic Group Using Structurally Homogenous Segments. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 74 (8): 1033-1044.
- Abraham J., Adolt R. 2006. Stand height estimation using aerial images and laser datasets. *EARSeL – Proceedings of the Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry*. 14-15 Feb. 2006, Vienna. 24-31.
- Antonarakis A. S., Richards K. S., Brasington J. 2008. Object-based land classification using airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment* 112: 2988-2998.
- Ayrey E., Hayes D. J., Fraver S., Kershaw J. A. Jr, Weiskittel A. R. 2019. Ecologically-Based Metrics for Assessing Structure in Developing Area-Based, Enhanced Forest Inventories from LiDAR. *Canadian Journal of Remote Sensing*. DOI: <https://doi.org/10.1080/07038992.2019.1612738>.
- Będkowski K. [red.]. 2011. Las w rastrowym modelu danych przestrzennych. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Będkowski K., Stereńczak K. 2008. Przestrzenny rozkład punktów odbić impulsów skanera laserowego a wybrane cechy drzewostanu. *Roczniki Geomatyki* 6 (8): 55-60.
- Będkowski K., Stereńczak K. 2010. Porównanie numerycznych modeli terenu obszarów leśnych generowanych z wykorzystaniem danych skaningu laserowego (LiDAR) uzyskanych w okresie wiosennym i letnim. *Roczniki Geomatyki* 8 (7): 11-20.
- Będkowski K., Zarzecka M. 2011. Detekcja warstw drzewostanu na podstawie chmur punktów skanowania laserowego. W: Będkowski K. [red.]. *Las w rastrowym modelu danych przestrzennych*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa. 109-122.
- Bolibok L. 2003. Dynamika struktury przestrzennej drzewostanów naturalnych w oddziale 319 BPN – czy biogrupy drzew są powszechne i trwałe w nizinnym lesie naturalnym? *Sylvan* 147 (1): 12-23. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2003002>.
- Brzeziecki B. 2005. Wpływ trzebieży na zróżnicowanie strukturalne drzewostanów sosnowych. *Sylvan* 149 (10): 11-19. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2005058>.
- Cao Q. V., Dean T. J. 2011. Modeling Crown Structure from LiDAR Data with Statistical Distributions. *Forest Science* 57 (5): 359-364.
- Chasmer L., Hopkinson C., Treitz P. 2006. Investigating laser pulse penetration through a conifer canopy by integrating airborne and terrestrial lidar. *Can. J. Remote Sensing* 32 (2): 116-125.
- Fidalgo-González L. A., Arellano-Pérez S., Álvarez-González J., Castedo-Dorado F., Ruiz-González A. D., González-Ferreiro E. 2019. Estimación de la distribución vertical de combustibles finos del dosel de copas en masas de *Pinus sylvestris* empleando datos LiDAR de baja densidad. *Revista de Teledetección* 53: 1-16. DOI: <https://doi.org/10.4995/raet.2019.11241>.
- Franklin J. F., Van Pelt R. 2004. Spatial Aspects of structural Complexity in Old-Growth Forests. *Journal of Forestry* 4/5: 22-28.
- Gendek A., Wężyk P., Moskalik T. 2018. Udział oraz dokładność szacowania pozostałości zrębowych w ogólnej masie pozyskanego drewna. *Sylvan* 162 (8): 679-687. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2018050>.
- Gil W. 1995. Drobnoskalowa zmienność warunków glebowych a struktura przestrzenna drzewostanu. *Las Polski* 24: 14-15.
- Goodwin N. R., Coops N. C., Culvenor D. S. 2006. Assessment of forest structure with airborne LiDAR and the effects of platform altitude. *Remote Sensing of Environment* 103: 140-152.
- Harding D. J., Lefsky M. A., Parker G. G., Blair J. B. 2001. Laser altimeter canopy height profiles. Methods and validation for closed-canopy, broadleaf forests. *Remote Sensing of Environment* 76: 283-297.
- Hawryło P., Wężyk P. 2018. Predicting Growing Stock Volume of Scots Pine Stands Using Sentinel-2 Satellite Imagery and Airborne Image-Derived Point Clouds. *Forests* 9: 274. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9050274>.
- Höfle B., Hollaus M., Lehner H., Pfeifer N., Wagner W. 2008. Area-based parameterization of forest structure using full-waveform airborne laser scanning data. *SilviLaser* 9: 17-19.
- Hyypä H., Yu X., Hyypä J., Kaartinen H., Kaasalainen S., Honkovaara E., Ronnholm P. 2005. Factors affecting quality of DTM generation in forested areas. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (3/W): 85-90.
- Kamińska G. 2000. Analiza struktury przestrzennej kompleksów leśnych z wykorzystaniem rastrowej bazy danych. *Sylvan* 144 (2): 27-36.
- Kolenda M. 2006. Taksonomia numeryczna. Klasyfikacja, porządkowanie i analiza obiektów wielocechowych. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej im. Oskara Langego we Wrocławiu, Wrocław.
- Kraus K. 2003. *Photogrammetrie*. Bd 1. Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. W. de Gruyter Verlag, Berlin.
- Kraus K., Pfeifer N. 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 53 (4): 193-203.

- Latifi H., Heurich M., Hartig F., Müller J., Krzystek P., Jehl H., Dech S. 2016. Estimating over- and understorey canopy density of temperate mixed stands by airborne LiDAR data. *Forestry* 89: 69-81. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpv032>.
- Lee A., Lucas R., Brack C. 2004. Quantifying vertical forest stand structure using small footprint LiDAR to assess potential stand dynamics. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (8/W2): 213-217.
- Lefsky M. A., Cohen W. B., Parker G. G., Harding D. J. 2002. LiDAR Remote Sensing for Ecosystem Studies. *BioScience* 52 (1): 19-30.
- Maltamo M., Paakkalén P., Yu X., Eerikäinen K., Hyypä J., Pitkänen J. 2006. Identifying and quantifying structural characteristics of heterogeneous boreal forest using laser scanner data. *Forest Ecology and Management* 216: 41-50.
- Meixner J., Kaźmierczak K., Najgrakowski T. 1997a. Wiek drzewostanu sosnowego a zmienność sum powierzchni przekroju i miąższości drzew na powierzchniach próbnych różnych wielkości. *Sylvan* 141 (2): 49-58.
- Meixner J., Najgrakowski T., Kaźmierczak K., Andrzejewski T. 1997b. Wiek drzewostanu dwupiętrowego a zmienność sum powierzchni przekroju pierśnicowego i miąższości drzew na powierzchniach próbnych różnych wielkości. *Sylvan* 141 (3): 13-25.
- Morsdorf F. 2011. Erfassung struktureller Waldparameter mithilfe von flugzeuggetragenem Laserscanning. Schweiz. Z. Forstwes. 162 (6): 164-170.
- Mücke W., Hermann A. 2010. Estimation of biodiversity relevant quantities from airborne laser scanning data. *Vermessung & Geoinformation* 4: 201-210.
- Myszkowski M., Ksepko M. 2010. Budowa pionowa drzewostanu w świetle przestrzennego rozkładu punktów lotniczego skanowania laserowego. *Roczniki Geomatyki* 8 (7): 30-48.
- Osberger A. 2010. Automatisierte Erfassung von Waldstrukturen im Nationalpark Bayerischer Wald mit objektbasierter Bildanalyse. *GIScience* 3: 109-116.
- Pancer-Kotejowa E., Szwagrzyk J. 1997. Zachowanie różnorodności biologicznej a gospodarka leśna. *Sylvan* 141 (3): 5-11.
- Parker G. G., Russ M. E. 2004. The canopy surface and stand development: assessing forest canopy structure and complexity with near-surface altimetry. *Forest Ecology and Management* 189: 307-315.
- Paschalis-Jakubowicz P. 2007. Kilka uwag do potrzeb inwentaryzacji lasu w użytkowaniu lasu wielofunkcyjnego. *Sylvan* 151 (9): 51-56. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2006104>.
- Pascual C., García-Abril A., García-Montero L. G., Martín-Fernández S., Cohen W. B. 2008. Object-based semi-automatic approach for forest structure characterization using lidar data in heterogeneous *Pinus sylvestris* stands. *Forest Ecology and Management* 255: 3677-3685.
- Pearsea G. D., Dasha J. P., Persson H. J., Watt M. S. 2018. Comparison of high-density LiDAR and satellite photogrammetry for forest inventory. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 142: 257-267.
- Pfeifer N. 2003. Ableitung von Oberflächenmodellen (z.B. Gebäudemodelle, Modelle durch Baumkronen) mit unterschiedlichen Filterverfahren. Universitätslehrgang „Laserscanning – Datenerfassung und anwendungsorientierte Modellierung“. 22-24.09.2003. Technische Universität, Wien.
- Pfeifer N., Gorte B., Elberink S. O. 2004. Influences of Vegetation on Laser Altimetry – Analysis and Correction Approaches. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science* 36 (8/W2): 283-287.
- Plan urzędzenia lasu Nadleśnictwa Rogów na okres 1.01.1999-31.12.2008. 1999. Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Leśny Zakład Doświadczalny w Rogowie.
- Pretzsch H., Seifert S., Huang P. 2011. Beitrag des terrestrischen Laserscannings zur Erfassung der Struktur von Baumkronen, Schweiz. Z. Forstwes. 162 (6): 186-194.
- Riano D., Chuvieco E., Condes S., Gonzalez-Matesanz J., Ustin S. L. 2004. Generation of crown bulk density for *Pinus sylvestris* L. from LiDAR. *Remote Sensing of Environment* 92: 245-352.
- Sačkov I., Scheer L., Bucha T. 2019. Predicting forest stand variables from airborne LiDAR data using a tree detection method in Central European forests. *Cent. Eur. For. J.* 65: 191-197. DOI: <https://doi.org/10.2478/forj-2019-0014>.
- Schmidtke H., Schard M., Hirschmugl M., Wack R., Ofner M., Granica K. 2011. Das Projekt „Neue Bestandeskarte“. Schweiz. Z. Forstwes. 162 (6): 171-177.
- Sherrill K. R., Lefsky M. A., Brandford J. B., Ryan M. G. 2008. Forest structure estimation and pattern exploration from discrete-return lidar in subalpine forests of the central Rockies. *Can. J. For. Res.* 38: 2081-2096. DOI: <https://doi.org/10.1139/X08-059>.
- Sławski M. 2012. Ilościowa charakterystyka zróżnicowania struktury borów sosnowych różnego wieku. *Sylvan* 156 (5): 349-359. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2011072>.
- Stereńczak K., Będkowski K. 2011. Wykorzystanie numerycznego modelu terenu i modelu pokrycia terenu do klasyfikacji drzewostanów na podstawie ich struktury pionowej i gatunkowej. *Sylvan* 155 (4): 219-227. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2010082>.
- Stereńczak K., Będkowski K., Weinacker H. 2008. Accuracy of crown segmentation and estimation of selected trees and forest stand parameters in order to resolution of used DSM and nDSM models generated from dense small footprint lidar data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Youth Forum* 38 (B6b): 27-33.

- Stereńczak K., Lisańczuk M., Erfanifard Y. 2018.** Delineation of homogenous forest patches using combination of field measurements and LiDAR point clouds as a reliable reference for evaluation of low resolution global satellite data. *Forest Ecosystems* 5: 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40663-017-0128-5>.
- Szmyt J., Ceitel J. 2011.** Zróżnicowanie przestrzenne i grubościowe drzew w niepielęgnowanych drzewostanach sosnowych o różnym zagęszczeniu początkowym. *Sylwan* 155 (11): 749-759. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2011010>.
- Szwagrzyk J., Szewczyk J., Bodziarczyk J. 1997.** Spatial Variability of a Natura Stand in the Babia Góra National Park. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry* 39: 61-78.
- Świć A. 1997.** Zróżnicowanie przestrzenne boru sosnowego bagiennego na przykładzie Poleskiego Parku Narodowego. *Sylwan* 141 (6): 65-70.
- Tickle P. K., Lee A., Lucas R. M., Austin J., Witte C. 2006.** Quantifying Australian forest floristic and structure using small footprint LiDAR and large scale aerial photography. *Forest Ecology and Management* 223: 379-394.
- Tracz W., Mozgawa J., Stereńczak K. 2011.** Wymiar fraktalny jako sposób opisu złożoności przestrzeni leśnej. *Sylwan* 155 (6): 384-392. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2010081>.
- Weinacker H., Koch B., Weinacker R. 2004.** TreesVis – a software system for simultaneous 3D-real-time visualisation of DTM, laser raw data, multispectral data, simple tree and building models. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (8/W2): 90-95.
- Yunsheng W., Weinacker H., Koch B. 2008.** A Lidar Point Cloud Based Procedure for Vertical Canopy Structure Analysis and 3D Single Tree Modelling in Forest. *Sensors* 8: 3938-3951.
- Zarzecka M., Będkowski K. 2012.** Analiza przestrzennej zmienności wybranych cech budowy pionowej drzewostanu na podstawie danych lotniczego skanowania laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 23: 501-508.
- Zawiła-Niedźwiecki T., Stereńczak K., Bałazy R., Wencel A., Strześliński P., Zasada M. 2008.** LiDAR w leśnictwie. *Teledetekcja Środowiska* 39: 59-66.
- Zawiła-Niedźwiecki T., Zasada M. [red.]. 2008.** Techniki geomatyczne w inwentaryzacji lasu – potrzeby i możliwości. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Żybura H. 1977.** Długość koron drzew w drzewostanach sosnowych. *Sylwan* 121 (1): 13-20.