

KRZYSZTOF BĘDKOWSKI, MICHAŁ BRACH, PIOTR BANASZCZAK

Sezonowa zmienność rozkładu chmury punktów skanowania laserowego w drzewostanach iglastych i jej związek z cechami taksacyjnymi drzewostanu*

Seasonal variability of distribution of laser scanning point cloud in coniferous stands and its relationship with stand valuation characteristics

ABSTRACT

Będkowski K., Brach M., Banaszczak P. 2011. Sezonowa zmienność i związek z cechami taksacyjnymi drzewostanu rozkładu chmury punktów skanowania laserowego w drzewostanach iglastych. Sylwan 155 (11): 736-748.

Increasing knowledge of the spatial structure of forests can contribute to the improvement of stand stability and silviculture rules. New opportunities in this respect are offered by the laser scanning technique, which allows to determine different stand characteristics and anticipate their spatial structure. It was found that certain features of laser pulse distribution histograms do not change significantly during the growing season and show a strong correlation with the characteristics of the stands located in the Rogów Arboretum, Warsaw University of Life Sciences – SGGW.

KEY WORDS

LIDAR, DTM, point cloud, accuracy, forestry

ADDRESSES

Krzysztof Będkowski ⁽¹⁾ – e-mail: Krzysztof.Bedkowski@wl.sggw.pl

Michał Brach ⁽¹⁾ – e-mail: Michal.Brach@wl.sggw.pl

Piotr Banaszczak ⁽²⁾ – e-mail: Banaszczak.lzd@interia.pl

⁽¹⁾ Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa; SGGW; ul. Nowoursynowska 159; 02-776 Warszawa

⁽²⁾ Leśny Zakład Doświadczalny w Rogowie; SGGW

Wstęp

Technika skanowania laserowego jest wykorzystywana w leśnictwie m.in. do określania wysokości drzew i drzewostanów. W tym celu budowane są numeryczne modele terenu (NMT) oraz modele pokrycia terenu (NMPT), opisujące ukształtowanie warstwy koron. Drzewostany tworzą często istotną barierę dla przenikania promieni świetlnych, czego wyrazem jest brak lub znikomy rozwój roślinności dna lasu. Zaleca się wobec tego, aby skanowanie drzewostanów liściastych wykonywać w stanie bezlistnym. Takich możliwości nie ma w przypadku drzewostanów gatunków iglastych, które utrzymują aparat asymilacyjny przez cały rok. Sytuację komplikuje często także zróżnicowanie ukształtowania terenu, gdyż spada wówczas znacznie dokładność

* Badania prowadzono w ramach pracy finansowanej ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy N N309 114537 „Las i jego cechy w rastrowym modelu danych przestrzennych”. Wykorzystano dane uzyskane w ramach projektu 2 P06L 02229 „Zastosowanie lotniczego i naziemnego skaningu laserowego w analizie struktury przestrzennej i funkcjonowania lasów w krajobrazie”.

budowanych modeli terenu [Guo i in. 2010]. Problematyka wykorzystania skanerów laserowych do określania cech taksacyjnych drzewostanów była przedmiotem badań wielu autorów. Pisze o tym obszernie Wężyk [2008] nawiązując do licznych prac autorów zagranicznych, szczególnie do wyników badań z krajów skandynawskich. Należy jednakże pamiętać o odmiennych, w porównaniu z naszymi lasami, składzie gatunkowym i budowie tamtejszych drzewostanów.

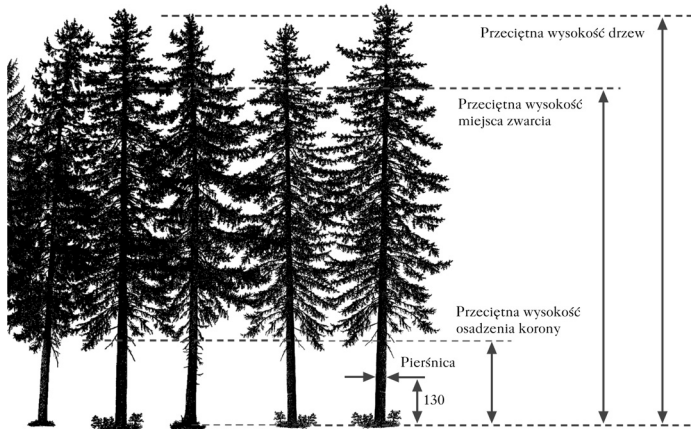
W niniejszej pracy omówiono rezultaty badań, których celem była analiza specyfiki przenikania promieni laserowych przez drzewostany różnych gatunków iglastych, a w szczególności:

- określenie charakterystycznych cech rozkładu punktów odbić impulsów laserowych,
- ocena istotności różnic między rozkładami impulsów laserowych uzyskanymi w tych samych drzewostanach w okresie wiosennym i letnim,
- analiza związków cech histogramu z wybranymi cechami taksacyjnymi drzewostanów,
- ocena wpływu drzewostanu na dokładność numerycznego modelu terenu tworzonego na podstawie interpolacji danych skanowania laserowego.

Wymienione powyżej zagadnienia mają duże znaczenie praktyczne. Stwierdzenie związków pomiędzy danymi skanowania laserowego i cechami taksacyjnymi drzewostanów pozwoli na usprawnienie procesu pozyskiwania danych o lesie, a także, co istotne, wnioskowanie o zmienności jego cech, czyli podział drzewostanów na mniejsze, homogeniczne jednostki przestrzenne. Wskazanie cech rozkładów punktów odbić impulsów laserowych, które są stabilne (niezmienne w sezonie wegetacyjnym), a przy tym mają znaczenie przyrodnicze, może stanowić uzasadnienie wykonywania skanowania laserowego w różnych porach roku. Przy wyznaczaniu wysokości drzewostanów stosowane są numeryczne modele terenu oraz numeryczne modele pokrycia terenu. Jak wynika z dotychczasowych badań, modele terenu dla obszarów leśnych, tworzone na podstawie dostępnych map topograficznych, charakteryzują się niewystarczającą dokładnością [Gajko i in. 2009; Będkowski, Stereńczak 2010]. Rozsądną alternatywą w takich przypadkach jest budowa modeli terenu na podstawie danych skanowania laserowego realizowanego w okresie wiosennym, co pozwoli na uniknięcie wpływu roślinności liściastej, lub stosowanie specjalnych algorytmów interpolacyjnych [Pfeifer 2003]. W pewnych warunkach należy się jednak liczyć z zakłócającym wpływem roślinności złożonej z gatunków iglastych [Będkowski i in. 2008a, b]. Logicznym wydaje się założenie, że przenikanie impulsów laserowych do dna lasu uzależnione jest od zwarcia drzewostanu. Rozpoznanie charakteru tego zjawiska pozwoliłoby na szacowanie spodziewanej dokładności numerycznego modelu terenu. Idąc dalej tym tokiem rozumowania i zakładając, że w przyszłości dysponować będziemy dokładnym modelem terenu, określenie stopnia przenikania impulsów do dna lasu może być jedną z przesłanek pozwalających na określenie zwarcia drzewostanu lub wielkości charakteryzujących np. biomasę.

Teren badań

Badania przeprowadzono w kilkunastu drzewostanach gatunków iglastych zlokalizowanych w Arboretum Leśnego Zakładu Doświadczalnego w Rogowie Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie (ryc. 1). Arboretum SGGW w Rogowie jest położone w centralnej Polsce (51°49'N, 19°53'E) na obszarze Wysoczyzny Rawskiej, na wysokości 185-192 m n.p.m. Jego łączna powierzchnia wynosi 54 ha. Badane drzewostany rozmieszczone są w różnych częściach Arboretum. Zakładane były od początku jego istnienia, tj. od roku 1923. Są to niewielkie poletka (głównie 0,04-0,5 ha) obsadzone leśnymi gatunkami drzew pochodzących z różnych regionów świata ze strefy klimatu umiarkowanego. Zostały założone celem oceny ich przydatności gospodarczej i ekologicznej do uprawy w Polsce, zasobności, zdrowotności oraz adaptacji



Ryc. 2.

Charakterystyki drzewostanów określone na podstawie pomiarów terenowych
Stand characteristics identified on the basis of field measurements

wykonano przy użyciu wysokościomierza SUUNTO PM-5/1520PS. Dla określenia stopnia zwarcia użyto skali zaproponowanej przez Włoczewskiego [1968]. Wykonano histogramy przedstawiające rozkład odbić punktów skanowania laserowego w warstwach półmetrowych (ryc. 3, tab. 2). Na podstawie ich analizy wyznaczono wysokość n.p.m. najniższej położonych odbić ułożonych z poziomem terenu (Z_{\min}), wysokość n.p.m. miejsca, w którym było najwięcej odbić impulsów laserowych, tj. maksimum histogramu ($Z_{\max H}$), wysokość n.p.m. najwyższego położonego odbicia (Z_{\max}), wskaźnik odbić od poziomu terenu (Q_T) oraz wskaźnik odbić w strefie maksimum histogramu ($Q_{\max H}$).

Liczbę odbić impulsów wyznaczano w warstwach, w jednakowym dla całego Arboretum przedziale wysokości od 185 do 227 m n.p.m. (ryc. 4). Jako warstwę należy rozumieć obszar o wysokości 0,5 metra pokrywający wybraną powierzchnię badawczą i agregujący znajdujące się w nim wszystkie punkty ze skanowania laserowego. W każdym drzewostanie poziom terenu identyfikowano z najniższą leżącą półmetrową warstwą, w której były zarejestrowane odbicia impulsów laserowych. Założenie takie było uprawnione, ponieważ teren Arboretum w poszczególnych drzewostanach jest w zasadzie płaski. Wskaźnik liczby odbić od poziomu gruntu (Q_T) wyznaczono poprzez utworzenie sumy wartości z dwóch najniższych warstw, którą następnie odniesiono do liczby wszystkich impulsów zarejestrowanych w drzewostanie i wyrażono w procentach. W podobny sposób obliczono wskaźnik odbić w strefie maksimum histogramu ($Q_{\max H}$), z tym że zsumowano odbicia z trzech kolejnych warstw, a więc ze strefy o grubości 1,5 m (średkowa warstwa odpowiadała maksimum histogramu). Dla potrzeb dalszych analiz obliczono wysokość histogramu (h_{\max}), tj. odległość najwyższego zarejestrowanego impulsu od poziomu terenu oraz wysokość maksimum histogramu ($h_{\max H}$):

$$h_{\max} = Z_{\max} - Z_{\min} \quad h_{\max H} = Z_{\max H} - Z_{\min}$$

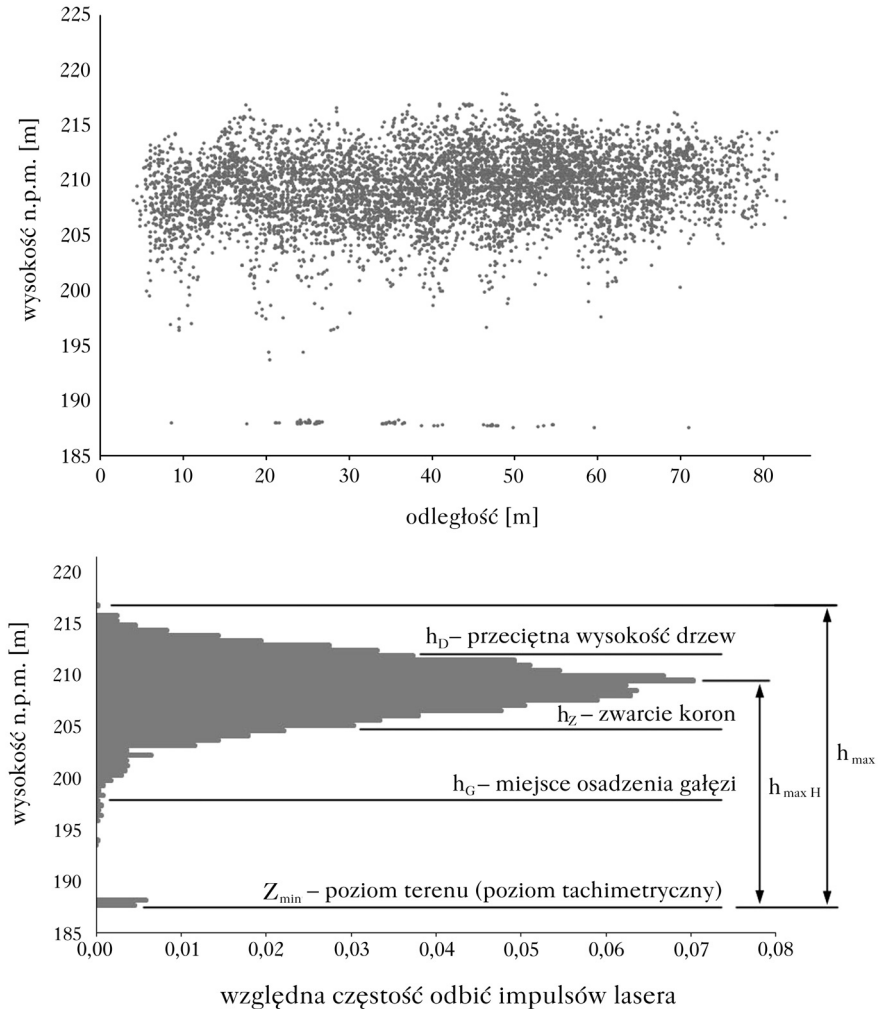
Zbadano dokładność numerycznych modeli terenu opisujących ukształtowanie terenu pod wybranymi drzewostanami. Do ich budowy zastosowano chmury punktów skanowania laserowego pierwszych odbić (FE=first echo), oddzielnie dla okresu wiosennego (W) i letniego (L). Modele miały rozdzielczość przestrzenną 1×1 m i interpolowano je za pomocą programu TreesVis [Weinacker i in. 2004].

Tabela 1.

Cechy drzewostanów wyznaczone na podstawie bezpośrednich pomiarów w terenie
Stand characteristics determined on the basis of direct field measurements

Nr obiektu	Gatunek	Przeciętna wysokość [m]			Pierśnica [cm] D _{1,3}	Zwarcie C _C
		h _D	h _Z	h _G		
1	<i>Abies grandis</i>	29	24	9	48	0,6
5	<i>Thuja plicata</i>	27	21	13	38	0,9
6	<i>Thuja plicata</i>	25	18	10,5	36	1,0
7	<i>Abies cephalonica</i> × <i>nordmanniana</i>	22	16	13	30	1,1
11	<i>Abies procera</i>	7,5	7,5	4	16	1,2
13	<i>Thuja plicata</i>	25,5	11	14	40	0,9
16	<i>Thuja plicata</i>	23	18	9	25	1,0
22	<i>Abies grandis</i>	26	23	16	32	0,5
25	<i>Abies grandis</i>	25	20	15	34	0,9
28	<i>Chamaecyparis pisifera</i>	19,5	17,5	8	23	1,1
31	<i>Abies alba</i>	20	17	10	23	1,2
32	<i>Tsuga canadensis</i>	12	10	9,5	26	0,5
39	<i>Picea mariana</i>	10	5	0	13	0,5
41	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	27	24	19	26	0,9
42	<i>Abies sachalinensis</i>	9	7	5,5	10	0,9
58	<i>Pinus cembra</i>	4	2,5	0	8	0,8
63	<i>Abies alba</i>	24,5	21	15	26	0,9
64	<i>Abies homolepis</i>	14,5	12	7,5	16	1,0
65	<i>Picea abies</i>	22	18	12	26	0,7
68	<i>Abies grandis</i>	30	22	17	33	0,8
69	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	30	22	16	32	0,8
70	<i>Abies koreana</i>	7,5	3,5	2,5	10	0,9
82	<i>Thuja occidentalis</i>	13	9	2	22	1,1
86	<i>Abies cephalonica</i> × <i>nordmanniana</i>	21	15	13	28	1,1
88	<i>Abies cephalonica</i> × <i>nordmanniana</i>	20	15	11	26	1,0
91	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	28	24	8	50	0,5
92	<i>Tsuga canadensis</i>	18	15	11	24	1,2
95	<i>Larix gmelini</i> var. <i>japonica</i>	10,5	8	5	15	1,2
99	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	27	23	8,5	27	0,9
101	<i>Abies grandis</i>	13	9	8	19	1,1
103	<i>Abies concolor</i>	25	21	4	43	0,9
116	<i>Thuja plicata</i>	22	18,5	10,5	27	1,1
671	<i>Abies procera</i>	13,5	10	7,5	25	0,4
672	<i>Abies procera</i>	14	8	6	20	1,1

Referencyjne dane o ukształtowaniu terenu zebrano poprzez pomiar tachimetryczny. Podstawą dla pomiarów tachimetrycznych na terenie Arboretum były zastabilizowane punkty, których współrzędne przestrzenne wyznaczono odbiornikiem GNSS. Zarejestrowano 20-minutowy zbiór obserwacji na każdym punkcie, po czym wszystkie dane poddano wyrównaniu za pomocą sieci ASG-EUPOS. Lokalizacja punktów podyktowana była warunkami terenowymi ze szczególnym uwzględnieniem widoczności nieba niezbędnym do rejestracji obserwacji odbiornikiem GNSS. Średni błąd wyznaczenia punktów w układzie współrzędnych 1992 w poziomie



Ryc. 3.

Charakterystyki drzewostanów określone na podstawie pomiarów terenowych
Stand characteristics identified on the basis of field measurements

wyniósł $m_p=0,0218$ m. Wysokość określono w układzie Kronsztadt 86 ze średnim błędem $m_h=0,0281$ m. Ciągły poligonowe poprowadzono tak, aby przy możliwie długich osiach celowych wykonać maksymalnie dużo pomiarów tachymetrycznych. Łącznie wykonano pomiar trzech ciągów poligonowych wraz z wyznaczeniem wysokości pikiet tachymetrycznych dla wybranych powierzchni na terenie Arboretum. Ciągi te wyrównano nie przekraczając odchyłek dopuszczalnych (tab. 3). W przypadku kilku powierzchni wykorzystano istniejące ciągi poligonowe zlokalizowane na terenie Arboretum (C900, C1000) oparte na bazach referencyjnych zlokalizowanych na zewnątrz kompleksu leśnego i pomierzone odbiornikiem GNSS. Średni błąd położenia punktów na bazach w pionie i poziomie nie przekraczał 0,04 m. Niską wartość błędów wyznaczenia wysokości w przypadku ciągu pierwszego uzyskano dzięki zastosowaniu niwelacji geometrycznej, dającej zdecydowanie lepsze wyniki wyznaczania punktów wysokościowych niż ma to

Tabela 2.

Charakterystyki opisujące histogramy rozkładów punktów skanowania laserowego w dwóch fazach sezonu wegetacyjnego

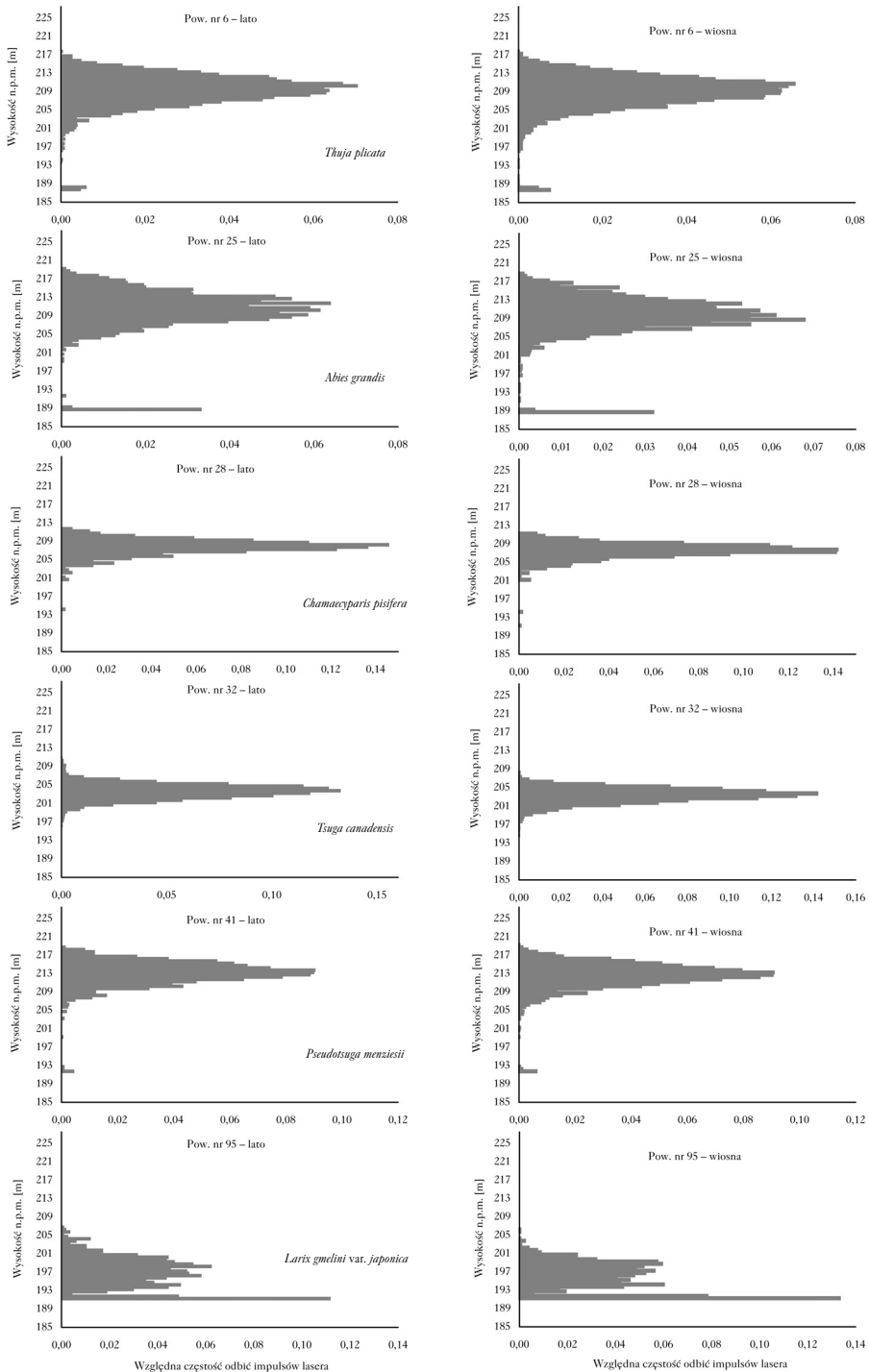
Characteristics describing the histograms of laser scan point distributions in two phases of the growing season

Nr obiektu	Wysokość [m n.p.m]						Wskaźnik odbić impulsów lasera [%]			
	teren		maksimum histogramu		najwyższe odbicie		od gruntu		w maksimum histogramu	
	W	L	W	L	W	L	W	L	W	L
1	191,5	191,5	209	209	213	214,5	5,9	4,3	18,7	21,3
5	187	187	208,5	210	217,5	217,5	0,7	0,7	18,7	19,7
6*	187,5	187,5	210,5	210	217,5	217,5	1,2	1,1	18,8	20
7*	186,5	188	203,5	202	212	213	0,2	0,1	18,5	17,1
11*	186	186	192	192	197	198	1,5	1,2	36,2	34,6
13	186,5	186,5	209,5	210	218	218,5	3,3	2,6	18,4	19,2
16	186,5	192,5	203,5	203,5	210	210	2,2	0,1	23,9	23,6
22	187,5	187,5	207,5	209,5	218	218,5	0,9	0,5	15,3	17
25	188,5	188,5	208,5	211,5	218,5	219	3,6	3,6	16,8	15,6
28	191	194	207,5	208	211	211,5	0,1	0,2	40,5	39,2
31	189	189	207	204	219	219,5	1,2	1,1	10,4	12,6
32*	194,5	196	203,5	203,5	208	210,5	0	0	39,1	37,7
39	188,5	188,5	196	197	200	203,5	19,3	17,6	25,3	24,2
41*	191,5	191,5	213	213,5	219	218,5	0,7	0,5	26	25,5
42*	191,5	192	199,5	200,5	216,5	216	2,1	1,8	15,4	14,6
58	191	191	193	193	196	196	56,5	53,3	26,4	29,4
63*	188,5	188,5	207	208,5	215	215	0,4	0,2	18,5	20,9
64*	188	188	201,5	202,5	215	214,5	3,7	0,9	15	19,2
65*	188	188	208	208	217	215	5,8	2,4	18,8	19,8
68*	187,5	187,5	210,5	208,5	219	219	3,1	4	14,2	13,5
69*	188	188	210	210	219	219,5	0,6	0,1	21,9	21,9
70*	188,5	188,5	192,5	193,5	199,5	199,5	2,1	1,6	24,5	28,6
82	188,5	188,5	198,5	199	208,5	209,5	8,6	5	26,1	28,1
86*	188	188	203,5	206,5	210,5	210,5	1,8	1,9	21,1	21,8
88	187	187	205	205	214,5	215	1,4	0,8	24,9	26,1
91	188,5	189	208	208	219	220	2,6	1,5	14,9	17,7
92*	199	200	203,5	204	207,5	208	0,1	0,6	50,8	51,9
95	191	191	198,5	198	206	206,5	21,2	16	16,9	16,2
99	192,5	192,5	213,5	213,5	219,5	220	1,5	1,8	26,7	27,6
101	191	191,5	204,5	205	217,5	218	0	0	18,6	17,7
103	192	192	211,5	210,5	215	215	4,9	6,2	22,1	22,6
116	188,5	188,5	205,5	205,5	216,5	215,5	1,7	0,7	12,7	16,6
671*	188,5	188,5	199,5	199	205	205,5	2,6	4,1	24	25,2
672*	188	188	198	199,5	204	205	2,5	2,5	18,1	21,4

W – wiosna; L – lato; * drzewostany, w których wykonano kontrolne pomiary tachymetryczne
W – spring; L – summer; * stands where control tachymetric measurements were completed

miejsce w przypadku metody tachymetrycznej. Dobór powierzchni badawczych objętych pomiarami tachymetrycznymi związany był z następującymi czynnikami:

- małe zróżnicowanie ukształtowania terenu – pozwoliło to uniknąć błędów przy generowaniu numerycznego modelu powierzchni terenu,



Ryc. 4.

Rozkład odbić impulsów lasera w warstwach półmetrowych wiosną i latem w wybranych drzewostanach
 Distribution of laser pulse reflection in 0.5-m layers during the spring and summer in selected stands

Tabela 3.

Parametry opisujące dokładność ciągów pomocniczych do pomiaru pikiet
Parameters describing the accuracy of auxiliary sequences for the measurement of pickets

Nazwa ciągu	Liczba kątów	Odchyłka liniowa [m]		Odchyłka kątowa [g]		Uzyskana odchyłka wysokościowa [m]	Długość ciągu [m]
		maksymalna	uzyskana	maksymalna	uzyskana		
1	7	0,14	0,11	0,0490	0,0460	0,01	276,76
2	6	0,17	0,03	0,0454	0,0401	0,19	425,38
3	4	0,12	0,01	0,0370	0,0307	0,14	142,20
C900	14	0,34	0,09	0,0359	0,0250	0,01	1211,22
C1000	8	0,22	0,03	0,0524	0,0285	0,06	796,46

- bliskość ciągów poligonowych – pomiary wykonywano w większości przypadków bezpośrednio z punktów ciągu, unikając tym samym komplikowania konstrukcji pomiarowych,
- dobór powierzchni z niewielkim udziałem gatunków podszytowych oraz drugiego piętra, co z jednej strony miało zapewnić większy udział punktów skanowania laserowego zlokalizowanych na powierzchni terenu, z drugiej zaś ułatwić pomiary tachymetryczne wykonywane w czasie pełnej wegetacji.

Wysokość punktów pomierzonych tachymetrycznie porównano z wysokością odpowiadających im miejsc w numerycznym modelu terenu i w obrębie każdego drzewostanu obliczono wartości błędów systematycznych oraz błędu średniokwadratowego RMSE (tab. 4). Błąd systematyczny wyznaczano na podstawie następującego wzoru:

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (Z_{LIDAR} - Z_{Tachim})}{n}$$

a błąd średniokwadratowy według równania:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Z_{LIDAR} - Bias - Z_{Tachim}]^2}{n}}$$

gdzie:

n – liczba obserwacji w danym drzewostanie,

Z_{Tachim} – wysokość terenu ustalona w pomiarze terenowym,

Z_{LIDAR} – wysokość odczytana z numerycznego modelu terenu zbudowanego z danych LIDARowych.

Jako wartości prawdziwe przyjęto wyniki pomiaru tachymetrycznego.

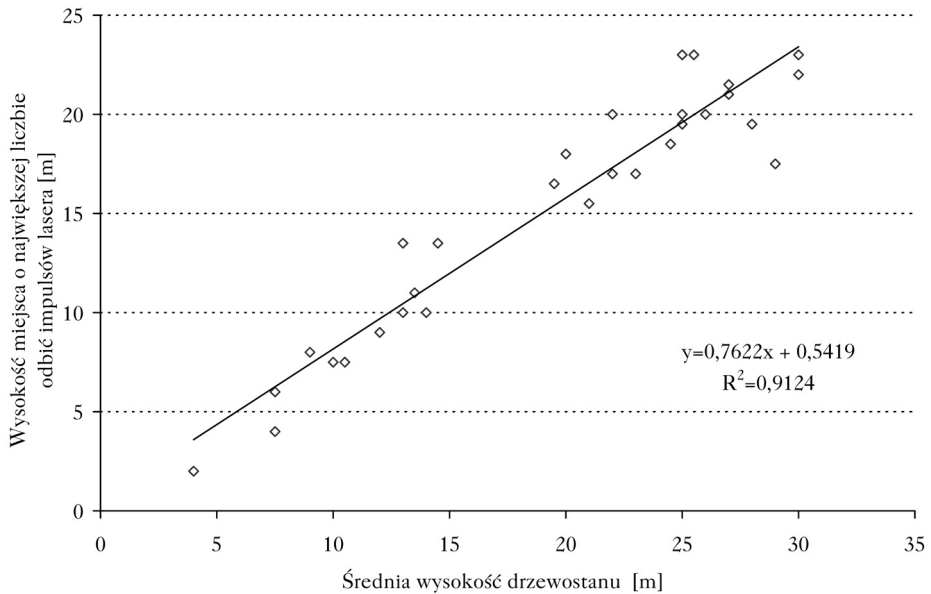
Ocenę, w jakim stopniu wyznaczone cechy drzewostanu (w analizach pominięto pierśnicę) są odzwierciedlone w histogramach, oparto na analizie korelacji (ryc. 5 i 6, tab. 5). Ponieważ w niektórych przypadkach stwierdzono różnice między wysokością terenu określoną na podstawie wyników skanowania wiosennego i letniego, do analiz przyjęto wysokość „wiosenną”. W analizie korelacji nie uwzględniono drzewostanu *Tsuga canadensis* (powierzchnia nr 92), gdyż oprócz zasadniczego drzewostanu występowała w nim niewielka liczba starszych, około 140-letnich sosen *Pinus sylvestris*, będących pozostałościami dawnego lasu mieszanego rosnącego w tym miejscu. Sosny te mają korony wysoko ponad zasadniczym okapem koron badanego drzewostanu i ich obecność zmieniła wyniki skanowania laserowego.

Tabela 4.

Błędy systematyczne (bias) oraz średniokwadratowe (RMSE) opisujące dokładność modeli terenu opracowanych na podstawie danych skanowania laserowego

Systematic (bias) and root mean square (RMSE) errors describing the accuracy of elevation models developed on the basis of laser scan data

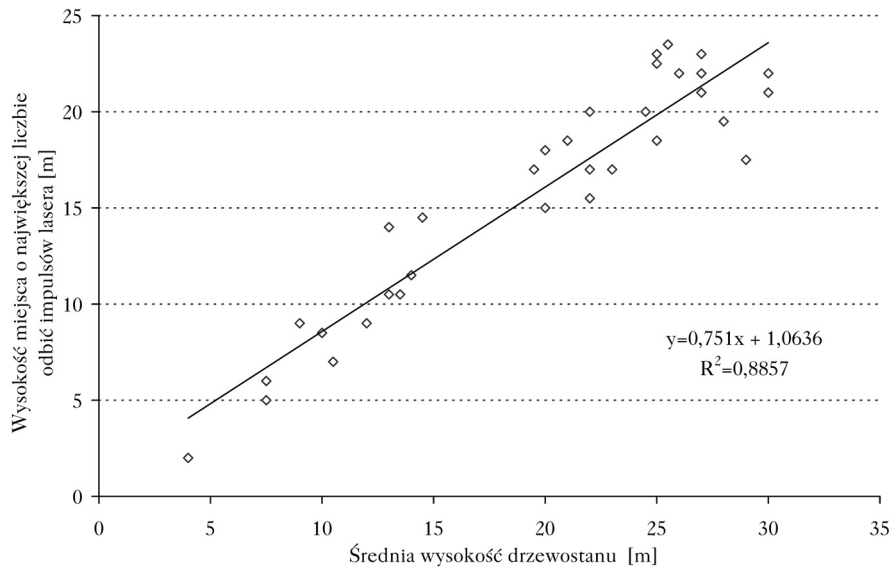
Nr obiektu	Liczba pomierzonych punktów	bias [m]		RMSE [m]	
		\bar{W}	\bar{L}	\bar{W}	\bar{L}
6	35	0,136	0,161	0,035	0,081
7	4	0,262	0,299	0,076	0,060
11	17	0,242	0,250	0,060	0,067
13	14	0,294	0,388	0,050	0,080
32	10	-0,121	-0,329	0,059	0,052
41	10	0,089	0,091	0,054	0,047
42	13	0,082	0,128	0,073	0,108
63	8	0,162	0,173	0,052	0,062
64	9	0,159	0,181	0,049	0,086
65	39	0,124	0,239	0,051	0,079
68	39	0,156	0,124	0,044	0,054
69	59	0,175	0,133	0,065	0,068
86	22	0,144	0,058	0,053	0,049
92	10	0,176	0,195	0,061	0,072
671	71	0,254	0,219	0,151	0,159
672	46	0,137	0,088	0,050	0,050



Ryc. 5.

Zależność między średnią wysokością drzewostanu i wysokością maksimum histogramu rozkładu odbić impulsów lasera w warstwach półmetrowych (dane LIDAR z okresu wiosennego)

Relationship between the average stand height and the maximum height of the histogram of laser pulse reflection distribution in 0.5-m layers (LIDAR data from the spring season)



Ryc. 6.

Zależność między średnią wysokością drzewostanu i wysokością maksimum histogramu rozkładu odbić impulsów lasera w warstwach półmetrowych (dane LIDAR z okresu letniego)

Relationship between the average stand height and the maximum height of the histogram of laser pulse reflection distribution in 0.5-m layers (LIDAR data from the summer season)

Tabela 5.

Wskaźnik korelacji wybranych cech drzewostanów i cech histogramów rozkładów punktów skanowania laserowego

Correlation ratio of selected characteristics of stands and histograms of laser scan point distributions

Termin skanowania	Cecha histogramu	Cecha drzewostanu			
		h_D [m]	h_Z [m]	h_G [m]	C_C
Wiosna	h_{max}	0,8131			
	h_{maxH}	0,9552	0,8807	0,7982	
	Q_T				-0,1411
	Q_{maxH}				0,2445
Lato	h_{max}	0,8238			
	h_{maxH}	0,9411	0,8642	0,8144	
	Q_T				-0,1649
	Q_{maxH}				0,2086

Dyskusja

Histogramy rozkładów odbić impulsów laserowych („wiosenne” i „letnie”), mimo iż dotyczą drzewostanów różnych gatunków, są do siebie bardzo podobne. Mają stabilne takie cechy jak:

- występowanie wyraźnego maksimum odbić w strefie koron,
- brak lub mała liczba odbić poniżej warstwy koron,
- drugie maksimum odbić na poziomie gruntu,
- latem wysokości h_{maxH} oraz h_{max} przesuwają się nieznacznie w górę, spada liczba odbić na poziomie gruntu.

Na podstawie pomiarów tachymetrycznych zrealizowanych w kilku wybranych drzewostanach można stwierdzić, że numeryczny model terenu (zarówno „wiosenny”, jak i „letni”) na ogół dobrze opisują ukształtowanie terenu, przy czym zawsze lepszy był model „wiosenny”. Modele miały rzędne wysokości terenu wyższe od rzędnych ustalonych poprzez pomiar tachymetryczny. Wyjątkiem, niewyjaśnionym, jest drzewostan *Tsuga canadensis* (nr 32). Zauważyliśmy jedynie, że brak było w nim odbić na poziomie terenu.

Zależności między niektórymi cechami drzewostanu i histogramu okazały się być bardzo silne. Najsilniejsze były związki przeciętnej wysokości (drzewostanu, miejsca osadzenia gałęzi i miejsca zwarcia koron) z wysokością maksimum histogramu $h_{\max H}$ oraz najwyższego odbicia impulsów laserowych h_{\max} . Stwierdzono zupełny brak zależności między wielkością zwarcia drzewostanu a cechami histogramu. Świadczy to zapewne o tym, że zwarcie nie opisuje „oporu”, jaki dla impulsów laserowych stwarza drzewostan. W istocie, decydują o tym nie sposób, w jaki stykają się ze sobą drzewa, lecz gęstość ich koron (ugaęzienie, masa igliwia) lub inne charakterystyki przestrzennego rozmieszczenia biomasy.

Podsumowanie

Istotnym wynikiem przeprowadzonych badań jest stwierdzenie, że rozkłady chmury punktów skanowania laserowego różnych gatunków iglastych wykazują cechy podobieństwa i nie zmieniają się istotnie w sezonie wegetacyjnym. Można wobec tego proponować, aby korzystać z nich (szczególnie z wysokości maksimum histogramu) przy wyznaczaniu wysokości drzewostanów. Numeryczne modele terenu w niektórych drzewostanach mogą być obciążone błędami z powodu zatrzymywania pewnej (lub znacznej) części impulsów laserowych w warstwie koron drzewostanu. Zastosowany algorytm ma wówczas zbyt mało danych, na których opiera interpolowaną powierzchnię NMT.

Zwarcie, w znaczeniu przyjętym przy sporządzaniu opisów taksacyjnych drzewostanów, nie jest powiązane z analizowanymi w niniejszej pracy charakterystykami rozkładu miejsc odbić impulsów promieniowania laserowego. Niezbędne jest podjęcie szerszych badań nad wykorzystaniem analizy rozkładu miejsc odbić impulsów skanowania laserowego do opisu struktury różnych drzewostanów – także wielowarstwowych oraz gatunków liściastych – z uwzględnieniem ich zmienności sezonowej oraz przestrzennej.

Literatura

- Będkowski K., Adameczyk J., Brach M., Gzowski P., Karaszkievicz W., Krawczyk A., Marmol U., Mikrut S., Miścicki S., Moraña M., Olenderk H., Stereńczak K., Stępniewski P., Walo J., Zawadka R. 2008a. Raport końcowy projektu badawczego 2 P06L 02229 Zastosowanie lotniczego i naziemnego skaningu laserowego w analizie struktury przestrzennej i funkcjonowania lasów w krajobrazie. Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, SGGW w Warszawie.
- Będkowski K., Brach M., Stereńczak K. 2008b. Numeryczny model terenu obszaru zalesionego utworzony na podstawie skanowania laserowego i jego dokładność. Roczniki Geomatyki 6 (8): 49-53.
- 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.
- Gajko K., Myszkowski M., Ksepko M. 2009. Eksperyment w obrębie Zajma. Geodeta 1 (164): 60-62.
- Guo Q., Li W., Yu H., Alvarez O. 2010. Effects of Topographic Variability and Lidar Sampling Density on Several DEM Interpolation Methods. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 6: 701-712.
- Pfeifer N. 2003. Oberflächenmodelle aus Laserdaten. Vermessung & Geoinformation 4: 243-252.
- Weinacker H., Koch B., Weinacker R. 2004. TreesVis: A Software System for Simultaneous 3D-Real-Time Visualization of DTM, DSM, Laser Raw Data, Multispectral Data, Simple Tree and Building Models. Proceedings of the ISPRS working group VIII/2, Freiburg, 3-6 2004. 90-95.
- Wężyk P. 2008. Modelowanie chmury punktów ze skaningu laserowego w obszarze koron drzew. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji 18b: 685-695.
- Włoczewski T. 1968. Ogólna hodowla lasu. PWRiL, Warszawa.

SUMMARY

Seasonal variability of distribution of laser scanning point cloud in coniferous stands and its relationship with stand valuation characteristics

Laser scanning technique introduces a new quality to the methods of forest space measurement. It allows to obtain in a very short time a large amount of information in the form of clouds of points representing the laser beam reflected from different parts of the forest. At the moment, many scientists all around the world focus their studies on correct interpretation of the point cloud distribution and its correlation with stand valuation characteristics. This will speed up the inventory process and can contribute to an increase in the amount of information about the forest. In this study, an attempt was made to analyse the results of air laser scanning made in 2007 for areas within the Rogów Arboretum (fig. 1).

The selection of research areas was dictated by several factors such as the relatively low diversity of the terrain, access to the geodetic reference data and the small proportion of underbrush and understorey species. This eliminates the factors that may affect the point cloud structure and provides a reliable dataset to analyse only the trees located in the overstorey. An important element in locating the reflected laser signals is their height above ground level. It determines the majority of characteristics describing the structure of stands.

To obtain accurate reference material, tachometric measurements were made on the basis of stabilised geodetic points that were assigned spatial coordinate. A comparison of the digital elevation model derived from the lowest points of laser scanning with geodetic measurements showed small differences in the altitudes oscillating around the level of a dozen or so centimetres (tab. 4). In the further stage of the study, detailed field measurements were carried out in selected areas in the Arboretum. The following characteristics were determined: tree height (h_D), the height of canopy closure (h_Z), the height of the crown position on the stem (h_G), breast height diameter and canopy closure.

Point cloud analysis was performed on histograms (figs. 3 and 4) showing the frequency of laser pulse reflections for individual altitudes. The number of reflections is quite heavily correlated with the characteristics of trees that were measured in the field. A very strong correlation ($R^2 = 0.9124$) was found, inter alia, between the maximum of the histogram and the average tree height (figs. 5 and 6). An analysis of the histograms for the summer and spring, in which scanning was conducted, revealed just small differences in the histograms. One can observe a larger share of reflections in the spring, which is justified by the development of the assimilatory apparatus of trees and shrubs. From the point of view of correctness of determining the main stand characteristics, the season of year is of little importance for laser scanning. Correct identification of the reference area from laser scanning pose a certain problem, especially during summer. A small number of pulses entering the forest floor can falsify the digital elevation model, which in the areas with large differences in the terrain level (denivelation) may contribute to the occurrence of significant errors in estimating the stand height structure. In spite of some shortcomings of this technology, it is worth noting that some stand characteristics can today be determined very precisely. Further analysis of the point clouds in reference areas can help improve forest knowledge and simplify stand inventory methods.