

KRZYSZTOF STEREŃCZAK

# Określenie zagęszczenia drzewostanów z wykorzystaniem danych z lotniczego skanowania laserowego\*

Determination of stand density using data from airborne laser scanning

## ABSTRACT

Stereńczak K. 2013. Określenie zagęszczenia drzewostanów z wykorzystaniem danych z lotniczego skanowania laserowego. Sylwan 157 (8): 607-617.

Airborne laser scanning (ALS) technology allows collecting data describing top forest layer in a very accurate way. This provides a possibility to generate crown height models (CHM) with resolution in which single tree crowns can be detected. In presented study highly automatic algorithm for single tree detection is presented. FALCON II ALS acquired data in Forest Experimental Station in Rogów (central Poland). Data used for algorithm accuracy evaluation were acquired by measuring sample plots on VSD photogrammetric station. CHM with the resolution of 0.5 m has been used in the presented research. Algorithm, in automatic or semi-automatic way, defines single crowns. Each of the end segments was additionally processed for correctly defined size and area of the crown projection. Received accuracy of correctly detected trees was 69% for all samples (71% for pine stands and 61% mixed stands) in automatic method and 74% (78% and 65% respectively) in semi-automatic method.

## KEY WORDS

forestry, segmentation, CHM, accuracy

## ADDRESSES

Krzysztof Stereńczak – e-mail: K.Sterenczak@ibles.waw.pl

Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa; SGGW w Warszawie;  
ul. Nowoursynowska 159; 02-776 Warszawa

## Wstęp

Badania nad możliwościami wykorzystania lotniczego skanowania laserowego w analizach środowiska leśnego rozpoczęto w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych XX wieku w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej [Nelson i in. 1984; Maclean, Krabill 1986] oraz w Rosji [Sołoduchin i in. 1977, 1979a, b]. Począwszy od lat 90. ubiegłego wieku, znaleźć można bardzo wiele prac traktujących o wykorzystaniu lotniczego skanowania laserowego do określania parametrów drzewostanu w oparciu o modele terenu oraz nieprzetworzone chmury punktów. Dotyczą one m.in. filtracji i interpolacji numerycznego modelu terenu (NMT) w warunkach leśnych [Kraus, Pfeifer 1998; Sithole, Vosselman 2004], jego dokładności [Sithole, Vosselman 2004; Będkowski i in. 2008; Stereńczak, Kozak 2011] czy określania wysokości drzew i drzewostanów [Clark i in. 2004; Hopkinson i in. 2004a, b]. Przedmiotem wielu prac było określanie cech pojedynczych drzew [Persson i in. 2002; Hyypä i in. 2004; Morsdorf i in. 2004; Będkowski, Stereńczak 2008a, b; Wężyk i in. 2008] oraz cech całych drzewostanów [Diedershagen i in. 2003; Blaschke i in. 2004]. Prowadzone badania zmierzały do określenia takich charakterystyk drzewostanu oraz metod ich

\* Badania wykonane dzięki grantowi MNiSW „Wykorzystanie danych lotniczego skanowania laserowego do określania zagęszczenia drzew w jednopiętrowych drzewostanach sosnowych” NN 309 113237 realizowanemu w latach 2009-2011.

określania, które mogłyby posłużyć do szacowania zapasu drzewostanu [Maltamo i in. 2004a; Breidenbach i in. 2007] lub wielkości biomasy [Lefsky i in. 2002; Naeset 2004].

Można zaobserwować rozwój dwóch głównych kierunków inwentaryzacji drzewostanu z wykorzystaniem danych z lotniczego skanowania laserowego: obejmujący albo wykorzystanie parametrów pojedynczych drzew (ITD; ang. Individual Tree Detection), albo modelowanie parametrów uzyskanych z powierzchni próbnych (ABA; ang. Area-Based Approach) [Kaartinen, Hyypä 2008]. Dokładność pierwszego sposobu zależy przede wszystkim od dokładności określenia liczby drzew na jednostkę powierzchni. Należy zwrócić uwagę na to, że masa drewna znajduje się przede wszystkim w piętrze pierwszym, stąd najistotniejsze z punktu widzenia gospodarki leśnej jest właściwe określenie miąższości tej warstwy drzewostanu.

Opisano wiele metod segmentacji wysokościowego modelu koron [Hyypä i in. 2001; Persson i in. 2002; Diedershagen i in. 2003; Tiede i in. 2005; Koch i in. 2006]. Najpełniejszą listę istniejących algorytmów można znaleźć w raporcie Kaartinen i Hyypä [2008]. Znajduje się tam także analiza dokładności dwunastu różnych metod segmentacji. Podobną analizę przeprowadzili Vauhkonen i in. [2010], weryfikując sześć innych algorytmów. W zależności od metody różne były wyniki określania liczby drzew, dokładność określania zasięgu poszczególnych koron oraz korelacja wielkości korony z pierśnicą drzewa. Błędy metod sięgały nawet 50%, podczas gdy w innych publikacjach podawano znacznie wyższe dokładności. Generalną konkluzją było stwierdzenie, iż algorytmy wykazywały najlepsze dokładności dla drzewostanów, dla których były tworzone.

Segmentacja drzewostanu na pojedyncze korony to proces trudny. Sposób gospodarowania, skład gatunkowy, wiek oraz wiele innych czynników mają wpływ na ostateczną strukturę drzewostanów, stąd duże problemy ze stworzeniem algorytmu, który pozwala na analizę różnych drzewostanów. Podstawowym problemem jest potrzeba dostosowania wielkości okna wykorzystywanego filtra do wielkości korony [Diedershagen i in. 2004; Stereńczak i in. 2008, 2009; Tompalski, Wężyk 2009; Wężyk i in. 2010] lub określenie zależności między wysokością drzewa a średnicą korony [Popescu i in. 2003]. Filtracja ma za zadanie usunięcie niejednorodności na powierzchni drzew w celu upodobnienia całej korony do powierzchni wypukłej o dość regularnym kształcie i spadku. To relacja między wierzchołkiem korony a wysokością wykorzystywana jest do eliminowania nadmiaru znalezionych lokalnych maksimum, będących potencjalnymi wierzchołkami drzew.

Biorąc pod uwagę specyfikę polskich lasów, wyniki testów algorytmów [Kaartinen, Hyypä 2008; Vauhkonen i in. 2010] oraz trudności w uzyskaniu dostępu do proponowanych rozwiązań, istnieje potrzeba opracowania metod segmentacji drzewostanu dostosowanych do specyfiki gospodarki leśnej. Głównym celem pracy było stworzenie możliwie zautomatyzowanego algorytmu do analizy drzewostanu. Dokładność dwóch wariantów algorytmu zweryfikowano na podstawie drzewostanów sosnowych i mieszanych.

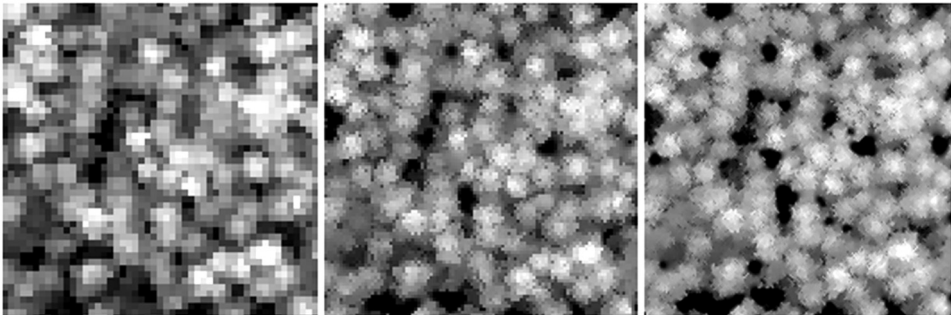
## Materiał i metody

OBIEKT BADAWCZY. Uroczysko Głuchów wchodzi w skład leśnictwa Głuchów i zajmuje powierzchnię 967,39 ha, z czego 905,42 ha stanowi powierzchnia zalesiona. Uroczysko położone jest na terenie gminy Głuchów w powiecie skierniewickim. Lesistość gminy wynosi około 11,8%. Główne typy gospodarstw leśnictwa Głuchów obejmują lasy brzoźowo-sosnowe, dębowo-sosnowe, sosnowe w przebudowie, dębowe (obecnie drzewostanów sosnowych w przebudowie), dębowe, jesionowo-dębowe (obecnie drzewostanów olchowych i częściowo sosnowych w przebudowie) i olszowo-jesionowe (obecnie drzewostanów olszowych w przebudowie).

**DANE Z LOTNICZEGO SKANOWANIA LASEROWEGO.** W pracy wykorzystano dane pozyskane w dniach 2-3 maja 2007 roku przez skaner laserowy FALCON II firmy TopoSys GmbH o pulsacyjno-włóknistym typie sensora. Długość wysyłanej fali wynosiła 1560 nm, a częstotliwość pulsów – 5 nsec. Skanowania dokonywano z wysokości 700 m z częstotliwością 83 kHz w zakresie 14,3°. Skaner rejestrował pierwsze i ostatnie odbicie. Średnica plamki skanera na ziemi wynosiła 0,7 m. W trakcie nalotu pozyskano również informację spektralną (kanały R, G, B i IR), stosując skaner linijkowy. Dane obrazowe przetworzono do postaci true-ortofotomapy o wielkości piksela odpowiadającej 0,25 m. Dane te pozyskano w ramach realizacji projektu „Zastosowanie lotniczego i naziemnego skaningu laserowego w analizie struktury przestrzennej i funkcjonowania lasów w krajobrazie” (2 P06L 02229). W sumie obszar skanowania miał kształt prostokąta o wymiarach około 6×8 km, czyli powierzchnię około 4800 ha.

**WYSOKOŚCIOWY MODEL KORON.** Wiele czynników wpływa na dokładność odwzorowania koron drzew w opisywanym modelu. W pierwszej kolejności są to gęstość chmury punktów, algorytmy interpolacyjne oraz rozdzielczość wykorzystanych modeli (ryc. 1). Do filtracji chmury punktów z lotniczego skaningu laserowego i interpolacji modeli terenu wykorzystano program TreesVis. Zaimplementowano do niego algorytm aktywnych konturów [Elmqvist 2000]. W zależności od tworzonej powierzchni (numeryczny model terenu lub numeryczny model pokrycia terenu), do interpolacji modeli o zadanej wielkości piksela wykorzystuje on najwyżej bądź najniżej położone punkty [Weinacker i in. 2004a, b]. W prezentowanej pracy zastosowano wysokościowy model koron (WMK) o rozdzielczości 0,5 m, gdyż gwarantowała ona możliwość analizowania dużych obszarów drzewostanów sosnowych z wysoką dokładnością i wydajnością [Stereńczak i in. 2008].

**DANE REFERENCYJNE.** Referencyjne powierzchnie próbne rozmieszczone zostały w wieźbie 200×200 m, zorientowanej w kierunku północ-południe. Założono je w roku 1998. Określenia zasięgu koron na stacji fotogrametrycznej VSD dokonał prof. Krzysztof Będkowski. Spośród 220 powierzchni inwentaryzowanych w Uroczysku Głuchów do analiz wybrano 63. 43 powierzchnie w wyniku wizualnej interpretacji ortofotomapy zaliczone zostały do kategorii „sosnowe”, gdzie sosna pokrywała minimum 70% ich powierzchni. Pozostałe zaliczono do kategorii „mieszane”, na nich sosna stanowiła maksimum 70% powierzchni. Spośród wszystkich powierzchni 2 znalazły się na skraju drzewostanu, przez 2 przechodziła droga, a 1 powierzchnia pokryła się z luką w drzewostanie. W sumie wykorzystano informacje o 1281 drzewach.



**Ryc. 1.**

Szczegółowość opisu środowiska leśnego w zależności od przyjętej rozdzielczości wysokościowego modelu koron (od lewej 1 m, 0,5 m i 0,25 m)

Accuracy of description of the forest environment depending on the adopted resolution crown height model (from left 1 m, 0.25 m and 0.5 m)

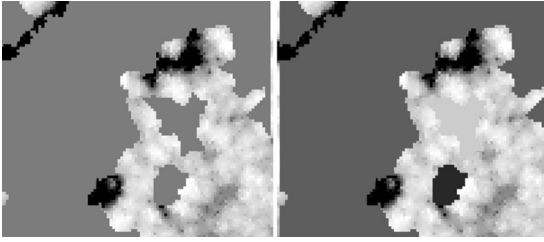
**METODA SEGMENTACJI.** W pracy wykorzystano wysokościowy model koron. Algorytm składa się z trzech głównych części. W fazie pierwszej definiowane są tzw. segmenty pierwotne. Faza druga obejmuje podział treści obrazu na mniejsze, homogeniczne pod względem wysokości fragmenty, które analizowane są w taki sam sposób. W fazie końcowej wszystkie wydzielone korony sprawdzane są pod kątem ich właściwej geometrii (kształtu). Następnie w oparciu o ostatecznie zdefiniowane rzuty koron określane są parametry pojedynczych drzew.

W pierwszej kolejności wydzielono 3 klasy wysokościowe, co wynikało z bardzo dużej zmienności wielkości koron. Wraz ze wzrostem wysokości wzrasta wielkość korony, więc filtracja musi być dopasowana do tej cechy. Jeśli w jednym zbiorze będą obiekty o różnej wielkości, to filtr o dużym oknie dobrze wygładzi obiekty duże, a połączy obiekty małe, zmniejszając ich faktyczną liczbę. Z kolei małe okno filtra spowoduje dobre wydzielenie małych drzew, ale dzieli korony większych. Aby więc maksymalnie poprawić działanie algorytmu, postanowiono wydzielić z obrazu obiekty znacznie różniące się wysokością. Wydzielenie 3 grup wysokościowych wynikało z cech sosny zwyczajnej, u której wielkość korony w drzewostanach dojrzałych wynosi około  $\frac{1}{3}$  wysokości drzewa [Żybuła 1977].

Następnie przeprowadzono filtrację pierwotną, która miała na celu przygotowanie modelu do pierwotnej segmentacji, czyli przede wszystkim zniwelowanie różnic wysokości w obrębie pojedynczych koron. Wielkość okna filtra Gaussa wykorzystanego na tym etapie wynosiła  $3 \times 3$  piksele. Segmentacja wykonana została przy wykorzystaniu algorytmu opadowego „pouring”. W pierwszej kolejności wykrywa on lokalne maksimum, a następnie wyznacza gradient wysokości na całym obszarze. Następnie dla każdego piksela wyznaczana była droga do lokalnego maksimum, zgodnie z kierunkiem gradientów lokalnych. Wszystkie piksele, których drogi spotykają się w jednym lokalnym maksimum, grupowane są jako jeden segment.

Segmenty wydzielono po określeniu wartości granicznych poszczególnych klas wysokościowych oraz po filtracji pierwotnej obrazu. Pośród segmentów pierwotnych znajdowały się również obiekty o nienaturalnie wydłużonym kształcie. By wychwycić i zmniejszyć do minimum ich liczbę, wyselekcjonowano te, dla których stosunek średnic elipsy opisanej na koronie mieścił się w przedziale 0,3-3,0, a następnie połączono je z sąsiednimi, z którymi długość wspólnej granicy była największa [Weinacker i in. 2004a]. Poprawione segmenty pierwotne wykorzystywane były w następnych etapach pracy algorytmu. Na podstawie wartości granicznych 3 klas wysokościowych przydzielono poligony pierwotne do poszczególnych klas wysokościowych. Następnie połączono je w jeden obiekt (ryc. 2). Jeżeli poszczególne grupy koron pierwotnych były od siebie oddalone przestrzennie (nie stykały się), były dzielone na osobne obiekty (ryc. 2). Różnorodność między obiektami wynikała z faktu, że albo w drzewostanie była duża zmienność wysokości (gniazda drzew oddalone od siebie), albo były to zupełnie inne drzewostany. Operacja podziału przeprowadzona została w ramach każdej klasy wysokościowej i dopiero ostateczne obszary były traktowane jako jednorodne powierzchnie poddawane kolejnym etapom właściwej segmentacji.

Analizując ponad 2000 pojedynczych wartości pikseli WMK i relacje między nimi oraz próbując różnej wielkości okna filtrów, określono sposób doboru wielkości okna filtra do homogenicznego fragmentu drzewostanu. Analizy wstępne prowadzono na wcześniej analizowanych WMK, dla których znana była wielkość okna filtra, przy której otrzymano najlepsze wyniki segmentacji. Fragment obrazu filtrowany był kolejno za pomocą filtra o różnej wielkości okna ( $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ,  $7 \times 7$ ,  $9 \times 9$  pikseli). Z wcześniejszych doświadczeń wynika, że dla rastra o wielkości piksela 0,5 m większe filtry dla drzewostanów sosnowych nie są potrzebne [Stereńczak i in. 2008]. Dla każdego przefiltrowanego obrazu określano lokalne maksimum, czyli najwyżej spośród otoczenia położony punkt. W założeniu jest to wierzchołek drzewa. Model oryginalny i przefiltrowany



Ryc. 2.

Etapy definiowania homogenicznych fragmentów drzewostanów w ramach klas wysokościowych

Stages of defining homogeneous stand fragments within the height classes

lewo – region powstały po zaklasyfikowaniu regionów pierwotnych do jednej klasy wysokościowej; prawo – podział regionu w klasie wysokości na części, o ile są one położone w pewnej odległości od siebie  
left – region formed after the classification of original regions to one height class; right – region's division into parts, only if they are located at a certain distance from one another

odejmowano od siebie i określono „wartość dopasowania”. W pierwszej kolejności dla każdego lokalnego maksimum odczytano wartość pikselu modelu różnicowego pokrywającego się z nim. Dla 4 pikseli oddalonych od lokalnego maksimum w czterech kierunkach (N, E, S, W) określano średnią arytmetyczną z modelu różnicowego oddalonego od lokalnego maksimum o 2 piksele. Średnia arytmetyczna znormalizowanych wyników porównania lokalnego maksimum i czterech pikseli sąsiednich była wartością dopasowania filtra, określaną osobno dla analizowanych wielkości okna. Największa z wartości dopasowania oznaczała najlepsze dopasowanie filtra. Taka wielkość okna wykorzystana została do filtracji homogenicznego fragmentu obrazu. W kolejnym etapie fragment obrazu uznany za homogeniczny rozsegmentowywany był indywidualnie. Segmenty poddawane były kolejnym etapom, w których definiowany był faktyczny kształt i zasięg rzutu korony na płaszczyznę poziomą.

W algorytmie wprowadzono procedurę, która polegała na ponownym wykonaniu analizy największych segmentów. W związku z tym dla określonego obszaru obliczano średnią arytmetyczną z powierzchni segmentów. Sprawdzano również rozkład powierzchni pojedynczych koron. Rozkład ten był podobny do rozkładu normalnego, stąd postanowiono wykorzystać średnią arytmetyczną i odchylenie standardowe do selekcji dużych koron. Te segmenty, których powierzchnia była większa od średniej powiększonej o jedno odchylenie standardowe, ponownie były poddawane filtracji. Wykorzystano filtr, którego wielkość okna była mniejsza o 2 piksele od filtra stosowanego w pierwszej filtracji. Zastosowanie dodatkowej procedury poprawiało wynik określania liczby drzew o około 10%.

W prezentowanej pracy rozszerzono opracowywany algorytm o moduł określający tę wartość, gdyż ustalenie właściwej powierzchni rzutu korony jest istotnym parametrem wykorzystywanym do określania wielu cech drzewostanów [Miścicki, Stereńczak 2012]. Założono, że w skład korony zakwalifikowane zostaną tylko te piksele, których wartość jest większa od wartości określonej przy pomocy funkcji definiującej relację długości korony i wysokości drzewa:

$$k = 0,7338 \cdot H + 0,2498$$

gdzie:

$k$  – wysokość osadzenia korony [m],

$H$  – wysokość drzewa [m].

Współczynniki funkcji mogą być zmienione w celu dopasowania jej do lokalnych warunków bądź ustalone dla poszczególnych gatunków na stałe.

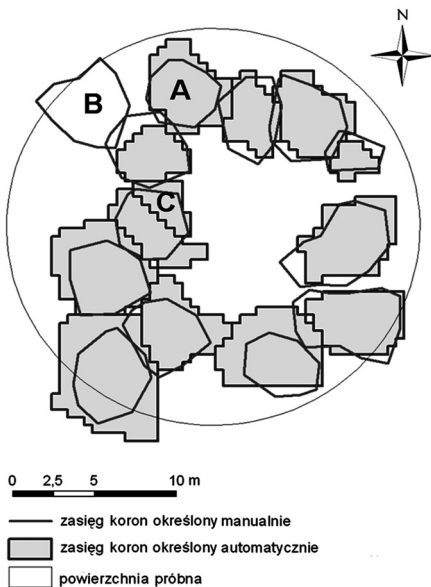
Dodatkowo zmodyfikowano procedurę automatyczną tak, by możliwe było manualne dopasowanie ustawień filtracji. Wynikało to z obserwacji wyników pracy automatycznej wersji aplikacji i obserwowanych czasami dużych błędów przypadkowych. Dzięki takiej modyfikacji możliwe

było manualne dopasowanie optymalnych ustawień wielkości filtra do analizowanego zestawu danych. Porównano oba warianty na tym samym zestawie danych. Cały algorytm utrwalony został w aplikacji ScanLas, będącej środowiskiem pracy współpracującym z bibliotekami programu Halon MVTec.

**WERYFIKACJA DOKŁADNOŚCI.** Wzrokowa weryfikacja wyników algorytmu była podstawową metodą określenia dokładności segmentacji na powierzchniach próbnych (ryc. 3). Drzewo uznawano za poprawnie zdefiniowane, gdy można było połączyć drzewo z pomiarów referencyjnych z drzewem z segmentacji automatycznej. Drzewo niewykryte (błąd niedoszacowania) to drzewo, które w trakcie segmentacji nie zostało znalezione lub dwa drzewa referencyjne złączono w jedno określone automatycznie. Drzewo znalezione w miejscu, gdzie nie zarejestrowano drzewa w trakcie pomiarów referencyjnych (błąd przeszacowania), to sytuacja, gdy algorytm dzielił koronę dużego drzewa na więcej części lub gdy obserwator dokonujący interpretacji zdjęć lotniczych na stacji VSD nie zauważył mniejszego drzewa rosnącego w cieniu drzew wyższych. Dodatkowo zliczono wszystkie wykryte przez algorytm drzewa w ramach powierzchni próbnych. Weryfikacja dokładności działania algorytmu wyrażona została liczbą wszystkich wykrytych obiektów na powierzchni i liczbą drzew poprawnie wykrytych odniesioną do danych referencyjnych. Badano obie wartości, gdyż, o ile liczba drzew właściwie wykrytych informuje nas o tym, jak skutecznie działa algorytm, to liczba wszystkich drzew wykrytych jest tą wartością, która wykorzystywana jest w automatycznych metodach analizy drzewostanu. Idealną byłaby sytuacja, gdyby obie te wartości były takie same.

## Wyniki

Metodą automatyczną poprawnie wykryto 877 drzew (68,5% drzew referencyjnych), a metodą półautomatyczną – 949 drzew (74,1% drzew referencyjnych). Dokładność procedur przedstawiono w tabeli 1. Najwyższy współczynnik determinacji związku liczby drzew wykrytych i referencyjnych odnotowano dla powierzchni sosnowych w wariancie segmentacji półautomatycznej, a najniższy dla powierzchni mieszanych w wariancie segmentacji automatycznej (tab. 2).



Ryc. 3.

Wyniki segmentacji i ich odniesienie do danych referencyjnych

Segmentation results compared with the reference data

A – drzewo poprawnie wykryte metodą automatyczną; B – drzewo niewykryte automatycznie (błąd niedoszacowania); C – fałszywie wykryte drzewo, powstałe przez podzielenie korony (błąd przeszacowania)

A – tree correctly detected by the automatic method; B – tree not detected automatically (underestimation error); C – falsely detected tree formed by crown segmentation (overestimation error)

Zarówno wiek drzewostanu, jak i zadrzewienie nie mają istotnego statystycznie wpływu na dokładność określania liczby drzew ( $p>0,05$ ). Dla wariantu półautomatycznego najlepsze wyniki uzyskano dla 4a klasy (ryc. 4). Z kolei dla wariantu automatycznego najwyższy procent poprawnie określonych drzew odnotowano dla klasy 3a, ale w tej klasie nie było drzewostanów mieszanych. Dla klasy 4b wartości dokładności między gatunkami były najbardziej zbliżone i tylko dla tej klasy wieku w opcji detekcji automatycznej wyższe wartości uzyskano dla drzewostanów mieszanych niż dla sosnowych (ryc. 4). Wskaźnik zadrzewienia jest w pewnym stopniu odzwierciedleniem gęstości drzewostanu. Widać wyraźnie rosnący trend dla drzewostanów mieszanych przy wariancie wszystkich drzew wykrytych (ryc. 5). Im większy wskaźnik zadrzewienia, tym większa liczba wszystkich znalezionych drzew. Oznacza to także większy błąd fałszywie znalezionych drzew, czyli drzew referencyjnych podzielonych w wyniku działania algorytmu na kilka mniejszych. Najlepsze wyniki segmentacji uzyskano dla wskaźnika zadrzewienia równego 0,8, przy czym różnica pomiędzy powierzchniami sosnowymi i mieszanymi dochodziła do 30% poprawnie wykrytych drzew dla metody automatycznej.

Tabela 1.

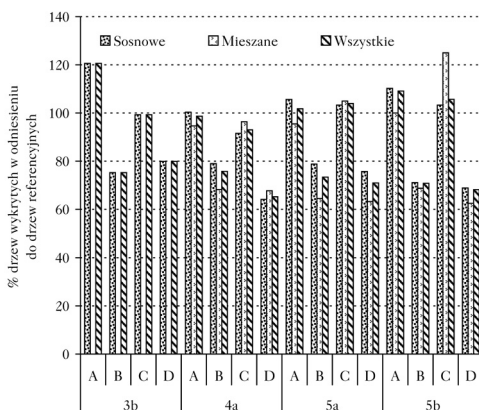
Segmentacja drzewostanów i powierzchni próbnych  
Segmentation of stands and sample plots

	Automatyczna detekcja drzew				Półautomatyczna detekcja drzew			
	Sosnowa		Mieszana		Sosnowa		Mieszana	
	[szt.]	[%]	[szt.]	[%]	[szt.]	[%]	[szt.]	[%]
Referencja	918	100,0	363	100,0	918	100,0	363	100,0
Drzewa wykryte	900	98,0	363	100,0	956	104,1	342	94,2
Drzewa poprawnie wykryte	651	70,9	222	61,2	714	77,8	236	65,0
Drzewa fałszywie wykryte	111	12,1	53	14,6	75	8,2	42	11,6
Drzewa niewykryte	150	16,3	81	22,3	131	14,3	85	23,4

Tabela 2.

Współczynnik determinacji między wynikami detekcji drzew w oparciu o WMK a danymi terenowymi  
Coefficient of determination between the CHM-based tree detection results and reference data

	Detekcja automatyczna			Detekcja półautomatyczna		
	Sosnowa	Mieszana	Wszystkie	Sosnowa	Mieszana	Wszystkie
Drzewa wykryte	0,74	0,32	0,69	0,82	0,75	0,80
Drzewa poprawnie wykryte	0,64	0,20	0,59	0,85	0,70	0,83

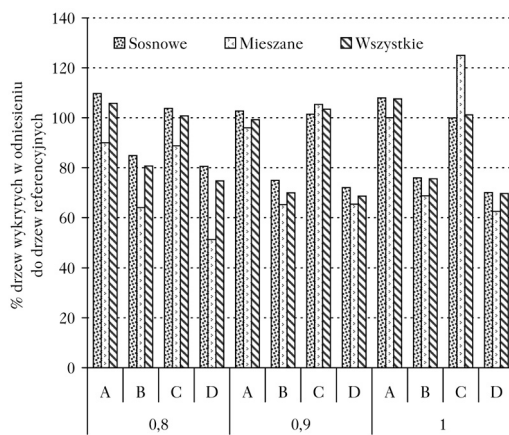


Ryc. 4.

Dokładność określania liczby drzew w zależności od klasy wieku i wariantu segmentacji

Accuracy of estimating the number of trees depending on age class and segmentation variant  
A – drzewa wykryte półautomatycznie; B – drzewa poprawnie wykryte półautomatycznie; C – drzewa wykryte automatycznie; D – drzewa poprawnie wykryte automatycznie

A – trees detected half-automatically; B – trees correctly detected half-automatically; C – trees detected automatically; D – trees correctly detected automatically



Ryc. 5.

Dokładność określania liczby drzew w zależności od wskaźnika zadrzewienia i wariantu segmentacji

Accuracy of estimating the number of trees depending on age class and segmentation variant

Oznaczenia jak na rycinie 4

Denotes as in figure 4

## Dyskusja

Dokładne określenie liczby drzew w pierwszym piętrze drzewostanu ma najważniejsze znaczenie, gdyż tu znajduje się prawie całkowita masa drewna [Persson i in. 2002; Maltamo i in. 2004b; Koch i in. 2006]. Osiągnięte w pracy wyniki określania liczby drzew porównywalne są z wynikami uzyskanymi przez innych badaczy [Hyypä i in. 2001; Persson i in. 2002; Tiede i in. 2005; Koch i in. 2006; Kaartinen, Hyypä 2008; Tompalski i in. 2009; Wang i in. 2008, Wężyk i in. 2010]. Uzyskany poziom poprawnie znalezionych drzew osiągnął dla wszystkich powierzchni 69% (71% dla powierzchni sosnowych i 61% dla drzewostanów mieszanych) w metodzie automatycznej i 74% (78% dla powierzchni sosnowych i 65% dla drzewostanów mieszanych) w metodzie półautomatycznej. Jest to o tyle zadowalające, że przedmiotem analiz były drzewostany sosnowe, w składzie których znalazły się dość duże domieszki drzew liściastych, i drzewostany mieszane.

Przeprowadzona próba skorelowania wyników segmentacji z cechami taksacyjnymi wydzieleni, w których zlokalizowano powierzchnie próbne, nie dała zadowalających wyników. Żadna z wykorzystanych cech nie była skorelowana z dokładnością segmentacji. Może to wynikać z faktu, iż opis cech taksacyjnych jest mało dokładny oraz że jest on pewnym uogólnieniem sytuacji w całym wydzieleniu. Detekcja drzew wykonana była w tym przypadku na małych powierzchniach próbnych będących niewielkim wycinkiem całego drzewostanu, gdzie lokalne warunki mogły mocno różnić się od opisu wydzielenia.

Z pomocą opracowanego algorytmu, po wydzieleniu drzewostanów sosnowych, automatycznie można określać liczbę drzew, zasięg pojedynczych koron, wysokość pojedynczych drzew oraz wydzielać fragmenty jedno- i wielopiętrowe drzewostanu. Przeprowadzone próby wykorzystania opracowanego algorytmu do segmentacji 130-letniego drzewostanu dębowego z wykorzystaniem WMK o rozdzielczości 1 m i 89-letniego drzewostanu świerkowego z wykorzystaniem WMK o rozdzielczości 0,5 m zakończyły się osiągnięciem bardzo zadowalających wyników. W obu przypadkach zastosowano automatyczne ustawienia algorytmu, gdyż sprawdzano jedynie dokładność określenia liczby drzew. W przypadku pomiaru innych cech pewne ustawienia musiałyby zostać dopasowane do właściwości biologicznych analizowanych gatunków. Proces segmentacji wykorzystuje jedynie informacje zawarte w wysokościowym modelu koron.

Przyjęty w prezentowanym algorytmie sposób określania zasięgu poziomego korony wykorzystuje zależności między wysokością drzewa a wysokością osadzenia korony. Inne stosowane rozwiązania bazują np. na zdefiniowanym maksymalnym spadku między sąsiadującymi pikselami



[Weinacker i in. 2004; Koch i in. 2006]. Za eliminacją pikseli znajdujących się poniżej określonego poziomu wysokości przemawia to, że wszelkie zmiany kształtu korony nie mają wpływu na dokładność wykorzystanego w prezentowanej pracy procesu. W przypadku cytowanej metody zmiana kształtu korony w stosunku do przyjętego schematu może prowadzić do zafałszowania powierzchni korony.

Opisywany w pracy algorytm jest zdecydowanie bardziej zautomatyzowany i przeznaczony do operacyjnego działania niż sposoby wcześniej prezentowane i wykorzystywane w Polsce [Kok, Wężyk 2006; Stereńczak i in. 2008; Stereńczak 2009; Myszkowski i in. 2009; Tompalski i in. 2009; Wężyk i in. 2010; Będkowski 2011]. Ponadto został on zweryfikowany na dużym materiale empirycznym. Opisana metoda została zastosowana m.in. do segmentacji drzewostanów Parku Narodowego Gór Stołowych. Na podstawie wyników segmentacji określono wielkość zapasu, wykorzystując dwufazową metodę inwentaryzacji zapasu [Miścicki 2000]. Również próba wykonana w Nadleśnictwie Milicz dla drzewostanów sosnowych i mieszanych dała zadowalające wyniki. Współczynnik korelacji określania zapasu na kołowych powierzchniach próbnych i wyników analizy danych lotniczego skanowania laserowego wyniósł  $>0,9$ .

## Wnioski

- ✦ Wykorzystanie danych lotniczego skanowania laserowego w drzewostanach gospodarczych sosny zwyczajnej i w drzewostanach mieszanych pozwala na określenie zagęszczenia z dokładnością około 75% drzew poprawnie określonych. Z gospodarczego punktu widzenia wynik ten może zostać uznany za zadowalający.
- ✦ Wykorzystanie dużej liczby danych referencyjnych udowodniło wysoką wiarygodność uzyskanej dokładności opracowanego algorytmu. Zaproponowany algorytm może zostać zastosowany w szerszych pracach poświęconych inwentaryzacji drzewostanów sosnowych.
- ✦ Opracowany algorytm do segmentacji jest wysoce zautomatyzowany i umożliwia analizowanie dużych fragmentów drzewostanów. Możliwe jest jego stosowanie także w analizach całych kompleksów leśnych.

## Literatura

- Będkowski K. 2011. Trees crowns segmentation on the basis of a digital surface model obtained from the interpolation of airborne laser scanning data. W: Jałowicki P., Łukasiewicz P., Orłowski A. [red.]. Information systems in management XIII: business intelligence and knowledge management. WULS Press. 7-18.
- Będkowski K., Brach M., Stereńczak K. 2008. Numeryczny model terenu obszaru zalesionego utworzony na podstawie skanowania laserowego i jego dokładność. *Roczniki Geomatyki* 6 (8): 49-53.
- Będkowski K., Stereńczak K. 2008a. Porównanie zasięgów koron drzew wyznaczonych na podstawie danych skanowania laserowego i pomiarów fotogrametrycznych. *Czasopismo Techniczne* 2: 16-25.
- Będkowski K., Stereńczak K. 2008b. Przestrzenny rozkład punktów odbić impulsów skanera laserowego a wybrane cechy drzewostanu. *Roczniki Geomatyki* 6 (8): 55-60.
- Blaschke T., Tiede D., Heurich M. 2004. 3D landscape metrics to modeling forest structure and diversity based on laser scanning data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 8/W2: 129-132.
- Breidenbach J., McGaughey R. J., Andersen H-E., Kandler G., Reutebuch S. E. 2007. A mixed effects models to estimate stand volume by means of small footprint airborne LIDAR data for an American and a German study site. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 3/W52F: 77-83.
- Clark M. L., Clark D. B., Roberts D. A. 2004. Small-footprint lidar estimation of sub-canopy elevation and tree height in tropical rain forest landscape. *Remotes Sending of Environment* 91: 68-89.
- Diedersshagen O., Koch B., Weinacker H., Schütt Ch. 2003. Combining LIDAR and GIS Data for the extraction of forest inventory parameters. W: Hyypä J., Nésset E., Olsson H., Granqvist Pahlén T., Reese H. [red.]. *Proceeding of the ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests*. 157-166.

- Hopkinson C., Chasmer L. E., Zsigovics G., Creed I. F., Sitard M., Treitz P., Maher R. V. 2004a. Errors in LIDAR ground elevation and wetland vegetation height estimates. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 8/W2: 108-113.
- Hopkinson C., Lim K., Chasmer L. E., Treitz P., Creed I. F., Gynan C. 2004b. Wetland grass to plantation forest – estimating vegetation height from the standard deviation of LIDAR frequency distributions. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 8/W2: 288-294.
- Hyypä J., Hyypä H., Litkey P., Yu X., Haggren H., Rönholm P., Pysalo U., Pitkanen J., Maltamo M. 2004. Algorithms and methods of airborne laser scanning for forest measurements. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 8/W2: 82-89.
- Hyypä J., Kelle O., Lehtikoinen M., Inkinen M. 2001. A Segmentation-Based Method to Retrieve Stem Volume Estimates from 3-D Tree Height Models Produced by Laser Scanners. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39 (5): 969-975.
- Kaartinen H., Hyypä J. 2008. EuroSDR/ISPRS Project, Commission II „Tree Extraction”, Final Report, EuroSDR. European Spatial Data Research 53.
- Koch B., Heyder U., Weinecker H. 2006. Detection of Individual Tree Crowns in Airborne Lidar Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 72 (4): 357-363.
- Kok R., Weżyk P. 2006. Process development and sequential image classification for automatic mapping using case studies in forestry. W: Koukal T., Schneider W. [red.]. *3-D Remote Sensing in Forestry*, Vienna. EARSeL SIG Forestry. ISPRS WG VIII/11: 380-384.
- Kraus K., Pfeifer N. 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 53: 193-203.
- Lefsky M. A., Cohen W. B., Parker G. G., Harding D. J. 2002. LIDAR Remote Sensing for Ecosystem Studies. *BioScience* 52 (1): 19-30.
- Maclean G., Krabill W. 1986. Gross-merchantable timber volume estimation using an airborne lidar system. *Canadian Journal of Remote Sensing* 12: 7-18.
- Maltamo M., Erikäinen K., Pitkanen J., Hyypä J., Vehmas M. 2004a. Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions. *Remote Sensing of Environment* 90: 319-330.
- Maltamo M., Mustonen K., Hyypä J., Pitkanen J., Yu. X. 2004b. The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in boreal nature reserve. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 1791-1801.
- Miścicki S. [red.]. 2000. Kombinowana dwufazowa inwentaryzacja lasów nizinnych z wykorzystaniem zdjęć lotniczych i stałych-kontrolnych powierzchni próbnych. Fundacja „Rozwój SGGW” Warszawa.
- Miścicki S., Stereńczak K. 2012. Cechy uzyskiwane z przetworzeń wysokościowego modelu koron wykorzystywane w dwufazowej metodzie inwentaryzacji zapasu. *Roczniki Geomatyki* 10 (5): 47-54.
- Morsdorf F., Meier E., Kotz B., Itten K. I., Dobbertin M., Allgower B. 2004. LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wild land fire management. *Remote Sensing of Environment* 92: 353-362.
- Myszkowski M., Klepko M., Gajko K. 2009. Detekcja liczby drzew na podstawie danych lotniczego skanowania laserowego. *Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej* 6: 63-72.
- Naesset E. 2004. Practical large-scale forest stand inventory using a small footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 164-179.
- Nelson R., Krabill W., Maclean G. 1984. Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment* 15: 201-212.
- Persson A., Holmgren J., Soderman U. 2002. Detecting and measuring individual trees using airborne laser scanning. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68 (9): 925-932.
- Popescu S. C., Wynne R. H., Nelson R. F. 2003. Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29 (5): 564-577.
- Sithole G., Vosselman G. 2004. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 59: 85-101.
- Sołoduchin W. I., Kulasow A. G., Utenkow B. I., Żukow A. J., Mażugin I. N., Emalanow W. P., Kopolow I. A. 1977. Sjomka profila krony dieriewa s pomoszczju lazirnogo dalnomiera. *Lesnoje Choziajstwo* 2: 71-73.
- Sołoduchin W. I., Mażugin I. N., Żukow A. J., Narkiewicz W. I., Popow J. W., Kulasow A. G., Marasin L. E., Sokolow S. A. 1979a. Lazirnaja aerosionka profilej lesa. *Lesnoje Choziajstwo* 10: 43-45.
- Sołoduchin W. I., Żukow A. J., Mażugin I. N., Bokow T. K., Poleżaj W. M. 1979b. Wozmożnosti lazirnoj aerosiemi profilej lesa. *Lesnoje Choziajstwo* 10: 53-58.
- Stereńczak K. 2009. Single tree detection based on airborne LIDAR (ALS) data. *Annals of Geomatics* 2 (32): 121-126.
- 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* 38 B6b: 27-33.

- Stereńczak K., Kozak J. 2010. Evaluation of digital terrain models generated from airborne laser scanning data under forest conditions. *Scandinavian Journal of Forest Research* 26: 374-384. doi: 10.1080/02827581.2011.570781.
- Tiede D., Hochleitner G., Blaschke T. 2005. A full GIS-based workflow for tree identification and tree crown delineation using laser scanning. *ISPRS Workshop CMRT 05*. 29-30 sierpnia, Wiedeń, Austria.
- Tompalski P., Wężyk P., de Kok R., Kukawski M. 2009. Determining tree number in pine stands using airborne laser scanning data and orthophotos. *Annals of Geomatics* 2 (32): 133-141.
- Vauhkonen J., Ene L., Gupta S., Heinzl J., Holmgren J., Pitkanen J., Solberg S., Wang Y., Weinacker H., Hauglin K.M., Lien V., Packalen P., Gobakken., Koch B., Naesset E., Tokola T., Maltamo M. 2010. Comparative testing of single-tree detection algorithms. *Proceedings of SilviLaser 2010 Freiburg*, Niemcy.
- Wang Y., Koch B., Weinacker H., Stereńczak K. 2008. LIDAR point cloud based fully automatic 3D single tree modeling in forest and evaluations of the procedure. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 38 B6b: 45-53.
- Weinacker H., Koch B., Heyder U., Weinacker R. 2004a. Development of filtering, segmentation and modeling modules for LIDAR and multispectral data as a fundament of an automatic forest inventory system. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 8/W2: 50-55.
- Weinacker H., Koch B., Weinacker R. 2004b. TREESVIS – A software system for simultaneous 3D-Real-Time visualization of DTM, DSM, Laser raw data, Multi-spectral data, simple tree and building models. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 8/W2: 90-95.
- Wężyk P., Tompalski P., de Kok R., Szostak M., Kukawski M. 2010. Metoda określania liczby drzew w drzewostanie z wykorzystaniem danych ALS oraz ortobrazów. *Sylvan* 154 (11): 773-782.
- Wężyk P., Tompalski P., Szostak M., Glista M., Pierzechalski M. 2008. Describing the selected canopy layer parameters of the Scots pine stands using ALS data. 8th international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory. *SilviLaser 2008*. Sept. 17-19. 2008 - Edinburgh. 636-645.
- Żyburka H. 1977. Długość koron drzew w drzewostanach sosnowych. *Sylvan* 121 (1): 13-20.

## SUMMARY

### Determination of stand density using data from airborne laser scanning

The airborne laser scanning (ASL) technology allows the collection of data which describe the highest layer of the stand in a very precise way. The reached level of accuracy enables to generate crown height models with a resolution allowing delineation of individual tree crowns. Since the nineties of the last century, there have appeared a number of studies on the application of airborne laser scanning technology to determine stand parameters based on terrain models and a cloud of points. In this study, a highly automated algorithm involving a crown height model for stand segmentation (delimitation) into individual tree crowns is developed.

The LSL data used in the study are acquired by the FALCON system for the Głuchów Area in the Forest Experimental Station in Rogów. Measurements of sample plots in the photogrammetric station VSD are the reference data for algorithm accuracy assessment. Altogether, data from 63 plots with a total of 1281 trees are used in the study.

The crown height model with a resolution of 0.5 meters is used in this study. Firstly, the developed algorithm allows to delineate homogeneous surfaces in the model. This process is based on the pre-defined height classes and original segments. In the next process, the size of the filter window is automatically or semi-automatically determined for each of the delineated surfaces and then segmentation is performed. Each of the delineated segments is subjected to the process during which an appropriate surface and shape of the crown projection area on the horizontal surface is defined.

The level of correctly selected trees amounts to 69% for all surfaces (71% for pine and 61% for mixed stands) in the automatic method, and 74% (78% for pine areas and 65% for mixed stands) in the semi-automatic method. No correlation is found between the accuracy of segmentation results and stand characteristics.