

MIŁOSZ MIELCAREK, RADOMIR BAŁAZY, TOMASZ ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI

Porównanie dokładności zdalnych metod szacowania wysokości drzew*

Comparison of the accuracy of remote methods of tree-height estimation

ABSTRACT

Mielcarek M., Bałazy R., Zawila-Niedźwiecki T. 2015. Porównanie dokładności zdalnych metod szacowania wysokości drzew. Sylwan 159 (9): 714-721.

The presented study deals with new capabilities of tree height estimation based on the remote sensing techniques. The main goal of this study is to find out the accuracy of tree height estimation based on LiDAR data and stereo-photogrammetric measurements. The area of investigation is located in the Western Sudetes Mountains (southern Poland). There were 75 trees chosen (*Picea* sp.) and measured using three different methods: traditional field measurements, stereo – photogrammetric observations and Airborne Laser Scanning (ALS). Tree heights estimated using LiDAR data and stereo-photogrammetric measurements were compared to heights acquired in the field. The mean tree height difference between LiDAR and field measurements was 0.60 m (RMSE=1.47 m), whereas the mean tree height difference between stereo-photogrammetric measurements and field equaled to –0.55 m (RMSE=1.04 m). The obtained results allow the conclusion to be drawn that Airborne Laser Scanning and stereo-photogrammetric observations are competitive with traditional methods of forest parameters measurements owing to the automation and accuracy of surveys. This study has confirmed that remote sensing techniques are effective and reliable methods of obtaining data for forest inventory.

KEY WORDS

airborne laser scanning, stereo-photogrammetry, tree height, forestry, LiDAR

ADDRESSES

Miłosz Mielcarek ⁽¹⁾ – e-mail: M.Mielcarek@ibles.waw.pl

Radomir Bałazy ⁽¹⁾ – e-mail: R.Balazy@ibles.waw.pl

Tomasz Zawila-Niedźwiecki ⁽²⁾ – e-mail: Tomasz.Zawila@lasy.gov.pl

⁽¹⁾ Instytut Badawczy Leśnictwa; ul. Braci Leśnej 3, Sękocin Stary, 05-090 Raszyn

⁽²⁾ Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych; ul. Grójecka 127, 02-124 Warszawa

Wstęp

Prowadzenie zrównoważonej gospodarki leśnej wymaga wykorzystywania kompleksowej i dokładnej informacji o lesie. Dlatego też planowanie powinno być oparte na szczegółowych metodach pomiaru. Wymaga to z jednej strony poprawnego stosowania metod statystycznych, z drugiej zaś wykorzystania nowych, bardziej precyzyjnych i wydajnych technik pomiaru drzew i drzewostanów.

*Materiały wykorzystane w niniejszych badaniach (łącznie z nalotem fotogrametrycznym i lotniczym skanowaniem laserowym) zostały zebrane w ramach projektu „Utworzenie dla obszaru Sudetów i Beskidu Zachodniego leśnego systemu informacyjnego w zakresie monitoringu i oceny stanu lasu” realizowanego w Instytucie Badawczym Leśnictwa na zlecenie Dyrekcji Generalnej Lasów Państwowych.

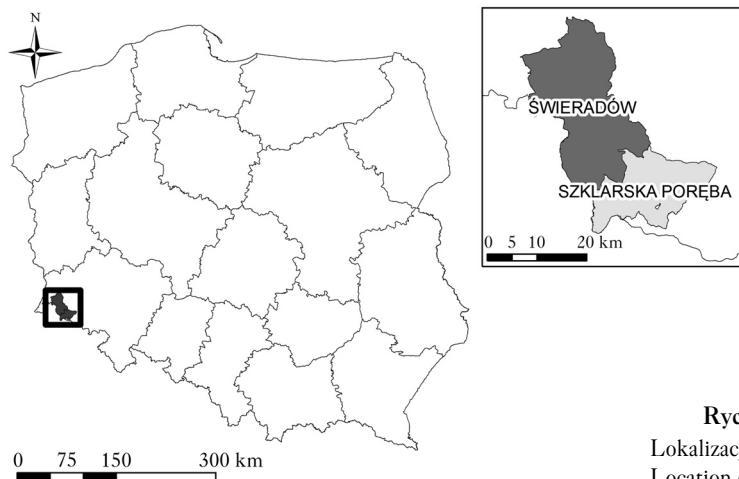
Szybki rozwój geoinformatyki powoduje, że istotną rolę w zdobywaniu informacji przestrzennej o lesie zaczynają odgrywać zdalne metody pomiaru drzew i drzewostanów. Lotnicze skanowanie laserowe (ALS), jak i stereofotogrametria mogą być skutecznymi metodami gromadzenia danych do inwentaryzacji lasu. Zastosowanie technik zdalnych daje możliwość zdobycia obiektywnych informacji, opisujących parametry struktury lasu oraz cech drzewostanu w bardzo krótkim czasie. Jest to niemożliwe do osiągnięcia za pomocą tradycyjnych metod inwentaryzacji lasu – ze względu na koszty, czasochłonność i ich subiektywność [Baltšavias 1999; Kraus, Pfeifer 2001].

Liczba potencjalnych zastosowań stereofotogrametrii i skanowania laserowego w leśnictwie jest ogromna. Leśnicy zainteresowani są przede wszystkim metodami określania cech, które charakteryzują drzewostany i są istotne dla planowania oraz zarządzania zasobami leśnymi. Jedną z takich cech jest niewątpliwie wysokość drzew i drzewostanów, która odgrywa znaczącą rolę np. w procesie szacowania zasobności biomasy drzewostanów [Będkowski 2008]. Ponadto wysokość drzew często jest mierzona w badaniach ekologicznych, charakteryzujących historie życia poszczególnych gatunków drzew i populacji [King, Clark 2011; Banin i in. 2012]. Wysokość drzew określana jest również jako wypadkowa bardzo istotnych z punktu widzenia leśnictwa zmiennych, jakimi są: jakość siedliska, kondycja drzewa oraz jego wiek, co pozwala na scharakteryzowanie efektów zabiegów gospodarczych [Wężyk i in. 2010].

Celem pracy jest sprawdzenie dokładności wyznaczania wysokości drzew przy użyciu zdalnych metod pomiarowych (lotnicze skanowanie laserowe oraz stereofotogrametria) w porównaniu do pomiarów naziemnych. Celem pośrednim było sprawdzenie użyteczności danych LiDAR do estymacji średniego przyrostu wysokości drzew.

Materiał i metody

Obiekt badawczy o łącznej powierzchni 705 km², obejmujący obszar Sudetów Zachodnich, położony jest w zachodniej części województwa dolnośląskiego w powiatach: lubańskim, lwóweckim oraz jeleniogórskim (ryc. 1). Gatunkami najczęściej występującymi w lesie są: świerk (72%), sosna (10%), brzoza (9%), dąb (5%) i buk (3%). Góry Izerskie i Karkonosze (700-1600 m wysokości względnej) stanowią pierwszą przeszkodę orograficzną na drodze napływających z zachodu wilgotnych mas powietrza. Tak specyficzne położenie ma decydujący wpływ na warunki klima-



Ryc. 1.

Lokalizacja obiektu badawczego
Location of the study area

tyczne, dla których charakterystyczne są wysokie opady (nawet 1300 mm) oraz krótki okres wegetacyjny.

Pierwszym etapem prac terenowych była selekcja wszystkich powierzchni kołowych założonych przez BULiGL podczas urządzania lasu w Nadleśnictwie Szklarska Poręba w 2008 roku. Podzielono je na klasy wysokości oraz klasy wieku (od 3 do 6 klasy), typując jednocześnie marszrutę pomiarów. Pomiary wykonano we wrześniu 2013 i sierpniu 2014 roku. Do pomiaru lokalizacji środków powierzchni próbnych wykorzystano odbiornik GPS TOPCON HiPer SR osadzony na 2-metrowej tyczce. Pomiar każdego ze środków powierzchni kołowych wykonywany był przez minimum 20 minut i przy widoczności co najmniej sześciu satelitów. Wyniki pomiarów poddawano postprocessingowi z wykorzystaniem poprawek ze stacji referencyjnych TPI. Deklarowana przez producenta dokładność dla tych pomiarów (warunki górskie, pod okapem drzewostanu) to minimum 0,50 m.

Lokalizację drzew na powierzchni odtwarzano na podstawie urzędniowych szkiców powierzchni kołowych. Najpierw lokalizowano tzw. drzewo środkowe, na którym pracownicy BULiGL zapisują odległość i azymut do środka powierzchni kołowej, następnie od tego miejsca ponownie wyznaczano środek powierzchni. Dzięki archiwalnym szkicom powierzchni kołowych domierzano drzewa, których wysokość była mierzona podczas prac urzędniowych. Każde z drzew, na których w 2008 roku dokonywano pomiaru wysokości, było również znakowane farbą, co dodatkowo ułatwiało ich identyfikację. Wysokość drzew mierzona była wysokościomierzem celownikowym marki Suunto, a azymuty busolą tej firmy.

Dane lotniczego skanowania laserowego pozyskano w okresie 23.07.-30.08.2012 roku. Do rejestracji chmury punktów użyto systemu RIEGL Airborne Laser Scanner LMS-Q680i (Lite Mapper 6800i, IGI). Średnia gęstość chmury punktów ALS to 6 pkt/m². Dokładność sytuacyjna (mp) oraz wysokościowa (mh) wyniosły odpowiednio: $\leq 0,20$ oraz $\leq 0,15$ m. Podczas lotu rejestrowano wszystkie elementy orientacji zewnętrznej chmury punktów oraz zdjęć za pomocą systemu GPS/IMU IGI-AeroControll w nawiązaniu do stacji referencyjnych sieci ASG-EUPOS.

Numeryczny Model Terenu (NMT) powstał w wyniku interpolacji punktów pochodzących z danych źródłowych sklasyfikowanych jako grunt. Wielkość piksela rastra wynosi 0,5 m, a dokładność wysokości poniżej 0,3 m. Numeryczny Model Pokrycia Terenu (NMPT) wygenerowany został w trakcie interpolacji punktów danych źródłowych sklasyfikowanych jako pokrycie terenu oraz grunt (w miejscach, gdzie grunt jest odkryty). Wielkość piksela rastra oraz szacowana dokładność wysokości, podobnie jak w przypadku NMT, wynosi odpowiednio: 0,5 oraz poniżej 0,3 m. Analizy wykonywane przez innych autorów potwierdzają wysoką dokładność, a zarazem przydatność do celów leśnych Numerycznych Modeli Terenu wygenerowanych z danych LiDAR [Stereńczak, Kozak 2011].

Pierwszym krokiem w przypadku pomiaru wysokości przy użyciu danych LiDAR było wykonanie segmentacji koron. W tym celu konieczne było zlokalizowanie drzew pomierzonych w terenie, a następnie dokonanie obrysu ich koron na bazie Różnicowego Modelu Pokrycia Terenu (rMPPT). Współrzędne drzew z pomiarów naziemnych posłużyły do wygenerowania pliku shp z warstwą punktową przedstawiającą dokładne położenie drzew w terenie. Następnie wygenerowana warstwa została nałożona na rMPPT, dzięki czemu możliwe było zlokalizowanie na rastrze 75 drzew, których wysokości pomierzono w terenie. Delineację koron wykonano ręcznie, przez co (w przypadku każdego drzewa) możliwa była bieżąca weryfikacja dokładności segmentacji oraz precyzyjne przypisanie punktów (drzew) do segmentów. W ramach każdego obrysu korony drzewa uzyskanego w procesie segmentacji dokonano obliczenia największej wartości piksela rastra obrazującego RMPT. Obliczenia wykonano przy użyciu oprogramowania ESRI ArcGIS

(narzędzie Zonal Statistics). Uzyskane w ten sposób wartości uznano za wysokości poszczególnych drzew.

W związku z tym, że pomiary naziemne wykonane zostały rok i dwa lata po nalocie fotogrametrycznym i skanowaniu laserowym, konieczne było obliczenie średniego rocznego przyrostu wysokości mierzonych drzew, a następnie niwelacja wysokości uzyskanej podczas pomiarów naziemnych o jeden przyrost (dla pomiarów wykonanych rok po nalocie) oraz o dwukrotność uzyskanego przyrostu (dla pomiarów wykonanych dwa lata po nalocie).

Obliczenia średniego przyrostu rocznego dokonano na podstawie danych LiDAR pozyskanych w trakcie nalotów wykonanych w latach 2007 i 2012. Na podstawie powyższych danych wygenerowano Różnicowe Modele Terenu. W celu minimalizacji błędów wynikających z różnych gęstości punktów LiDAR dla poszczególnych nalotów (2007 – 4 pkt/m², 2012 – 6 pkt/m²) przy kalkulacji różnicowych modeli pokrycia terenu wykorzystano ten sam numeryczny model terenu z 2012 roku (o większej gęstości punktów LiDAR). Następnie obliczono różnice w maksymalnych wartościach pikseli (wysokościach drzew) dla danego segmentu korony. W trakcie analizy uzyskanych wartości zaobserwowano, iż w przypadku kilku drzew różnica była ujemna. Przyczyną tego zjawiska może być kilka – zaczynając od wiatro- i śniegołomów, a kończąc na jakości danych LiDAR (istnieje możliwość, że wiązka lasera w trakcie nalotu z 2012 roku nie trafiła w najwyżej położony punkt w obrębie danej korony). Przy obliczaniu średniego przyrostu rocznego wzięto jednak pod uwagę wszystkie pomiary. Następnie oszacowany średni przyrost roczny został odjęty od wysokości drzew zmierzonej w terenie w latach 2013 (jednokrotność przyrostu) i 2014 (odjęto dwukrotność przyrostu).

Pionowe zdjęcia lotnicze pozyskano w dniach 23-24.07. oraz 28.07.2012 roku. Do wykonania zobrażeń wykorzystano kamerę cyfrową typu kadrowego (DMCII). Nalot zaplanowano w taki sposób, aby zachować 70-procentowe pokrycie podłużne i poprzeczne zdjęć. Terenowa wielkość piksela wykonanych fotografii jest nie większa niż 20 cm. Zdjęcia wykonano w zakresie 4 kanałów: pasma widzialnego (RGB) oraz bliskiej podczerwieni (NIR). Podczas wykonywania zdjęć zwracano szczególną uwagę na warunki atmosferyczne (bezchmurna pogoda oraz kąt padania promieni słonecznych >30°).

Pomiary wykonano przy użyciu cyfrowej stacji fotogrametrycznej (a więc bardzo wydajnego i zaawansowanego technologicznie sprzętu komputerowego) oraz sprzętu wykorzystywanego do stereofotogrametrii (wysokiej klasy karta graficzna, okulary, specjalne monitory 3D i urządzenia wskazujące). Wykorzystano oprogramowanie marki Intergraph (ERDAS; dodatek fotogrametryczny LPS).

Pierwszym etapem pomiaru było wygenerowanie modelu stereoskopowego ze zdjęć. W tym celu wykorzystano pliki aerotriangulacji oraz zdjęcia wykonane podczas nalotu stereofotogrametrycznego. Następnie do modelu stereoskopowego dodano wcześniej wygenerowaną warstwę punktową z drzewami pomierzonymi w terenie, dzięki czemu możliwe było zlokalizowanie tych drzew na modelu stereoskopowym. Ostatnim krokiem był pomiar wysokości drzewa, który polegał na odnalezieniu na stereogramie miejsca stanowiącego wierzchołek drzewa i postawieniu na nim punktu pomiarowego (uwzględniając projekcję poziomą i pionową). W wyniku pojedynczego pomiaru otrzymano punkt opisany współrzędnymi X, Y i Z. Odejmując wysokość terenu (wykorzystano NMT) z miejsca, w którym znajduje się wierzchołek, od wysokości wierzchołka, otrzymano wysokość drzewa. Pomiary wysokości drzew wykonano w oprogramowaniu ERDAS (narzędzie 3D Analyst). Za dane referencyjne uznano pomiary terenowe i do nich porównywano pozostałe wysokości oszacowane z wykorzystaniem metody stereofotogrametrycznej i danych LiDAR.

Wyniki i dyskusja

Wykazano, że nie ma istotnych różnic pomiędzy wariancjami badanych serii wysokości (test Levene'a). Wskazuje to na podobną zmienność w badanych grupach pomiarowych.

Średnia różnica pomiędzy pomiarami terenowymi i wysokościami uzyskanymi z danych LiDAR wyniosła 0,60 m (średni błąd kwadratowy = 1,47 m). Uzyskane wyniki są porównywalne do raportowanych przez naukowców wykonujących pomiary w drzewostanach o podobnej charakterystyce. Skandynawowie, jako jedni z pionierów badań europejskich dotyczących zastosowania danych LiDAR do określania wysokości i miąższości drzew [Hyypä, Inkinen 1999], analizując dokładność szacowania wysokości za pomocą danych LiDAR, uzyskali błędy średnie dla pojedynczych drzew na poziomie $\pm 1,00$ m (średni błąd kwadratowy dla drzewostanu wyniósł 2,30 m). Z kolei naukowcy niemieccy badający lasy bawarskie (świerk z domieszką jodły) raportują średni błąd kwadratowy dla wyznaczania wysokości drzew iglastych na poziomie 1,37 m [Heurich i in. 2004].

Dodatnia wartość uzyskanej różnicy wysokości wskazuje, iż wyniki otrzymane przy pomocy skanowania lotniczego laserowego są lekko zaniżane w stosunku do pomiarów terenowych, co potwierdzają również badania prowadzone przez naukowców w Polsce [Stereńczak i in. 2008], jak i poza granicami naszego kraju [Nilsson 1996; Nasset 1997]. Przyczyn tego zjawiska należy upatrywać w charakterystyce badanego gatunku. Mianowicie ze względu na kształt korony świerka (stożek) promienie lasera często nie trafiają dokładnie w wierzchołek drzewa, a odbijają się od niższych partii korony, co powoduje zaniżanie wysokości drzewa [Jung i in. 2011].

Z kolei średnia różnica pomiędzy pomiarami naziemnymi i stereofotogrametrycznymi wynosi $-0,55$ m (średni błąd kwadratowy = 1,04 m), co wskazuje, iż pomiary stereofotogrametryczne zostały lekko zawyżone w stosunku do pomiarów terenowych – znajduje to potwierdzenie w dotychczas publikowanych pracach [Będkowski 2008]. Sam wynik szacowania wysokości na podstawie obserwacji stereofotogrametrycznych nie odbiega znacząco od wyników uzyskiwanych w innych badaniach wykorzystujących stereofotogrametrię do pomiaru wysokości drzew. Będkowski [2008] raportuje średni błąd szacowania wysokości drzew na poziomie 1,00 m (pierwsza grupa drzew) oraz 0,57 m (druga grupa drzew).

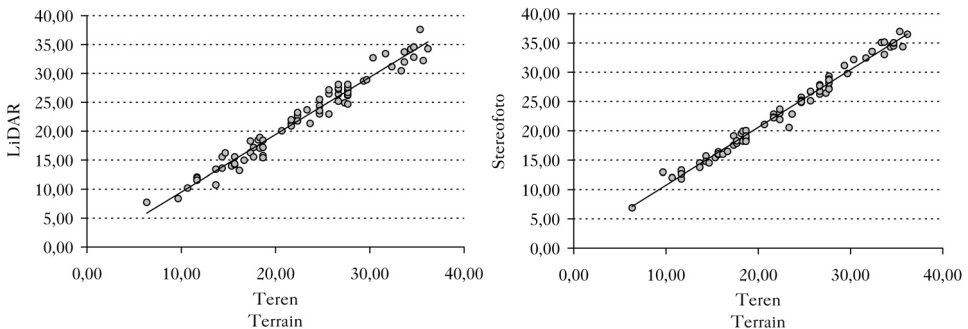
Test równości średnich wykazał, że dla przyjętego poziomu istotności ($p < 0,05$) różnice zaobserwowane pomiędzy grupami pomiarów należy uznać za istotne statystycznie (tab.). Trzeba jednak mieć na uwadze, iż istotność statystyczna różnic i ich praktyczne znaczenie to dwie różne kwestie. Warto przypomnieć, że różnice te są relatywnie małe i można je logicznie wytłumaczyć (wysokości LiDAR są zaniżane w stosunku do pomiarów terenowych, a wysokości pozyskane z modelu stereoskopowego zawyżane), dzięki czemu (pomimo istniejących błędów) możliwe jest korzystanie ze zdalnych metod pomiaru wysokości drzew w celach inwentaryzacji leśnej. Kolejnym czynnikiem mającym wpływ na wielkość różnic pomiędzy poszczególnymi metodami jest niewątpliwie dokładność pomiaru terenowego. Pomimo iż producenci wysokościomierzy zakładają, że dokładność sprzętu wynosi 0,10–0,20 m, to często błąd pomiarowy jest większy i wynosi nawet powyżej 0,50 m [Wężyk i in. 2008].

Analiza współczynnika korelacji wykazała, że uzyskane wysokości drzew są ze sobą bardzo silnie skorelowane. Zależność liniowa (współczynnik korelacji Pearsona) pomiędzy pomiarami terenowymi a pomiarami stereofotogrametrycznymi wynosi 0,99, z kolei dla danych LiDAR jest to wartość 0,98.

Silna korelacja pomiędzy wysokościami z pomiarów naziemnych oraz uzyskanymi z wykorzystaniem zdalnych metod inwentaryzacyjnych znajduje potwierdzenie w literaturze leśnej, gdzie

Tabela.Test równości średnich (poziom istotności $p < 0,05$)The equality of means test ($p < 0.05$)

Metoda Method	Różnica średnich Mean Difference [m]	Błąd standardowy Std. Error [m]	p	95-procentowy przedział ufności dla różnicy 95% Confidence interval for Mean		
				Dolna granica Lower Bound	Górna granica Upper Bound	
Teren	LiDAR	0,60	0,16	0,00	0,22	0,99
	Stereofoto	-0,55	0,10	0,00	-0,80	-0,29
LiDAR	Teren	-0,60	0,16	0,00	-0,99	-0,22
	Stereofoto	-1,15	0,15	0,00	-1,53	-0,78
Stereo- foto	Teren	0,55	0,10	0,00	0,29	0,80
	LiDAR	1,15	0,15	0,00	0,78	1,53

**Ryc. 2.**

Zależności pomiędzy wysokościami uzyskanymi z wykorzystaniem poszczególnych metod pomiarowych
Relationships between tree height obtained using different measurement methods

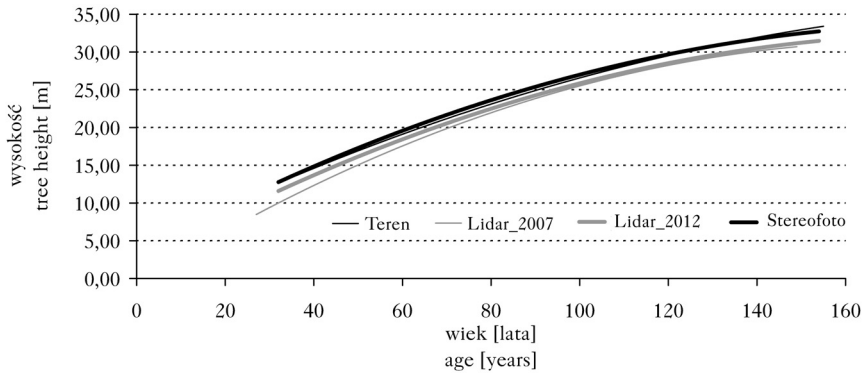
dla obserwacji stereofotogrametrycznych uzyskiwano wyniki $R=0,94$ [Stereńczak i in. 2008] oraz $R=0,99$ w przypadku wysokości otrzymanych z wykorzystaniem danych LiDAR [Heurich i in. 2004].

Krzywe wysokości obrazują różnice pomiędzy wynikami uzyskanymi przy pomocy poszczególnych metod pomiaru wysokości w kolejnych latach (ryc. 3). Szczególnej analizie poddano różnice pomiędzy dwoma pomiarami wykonanymi z wykorzystaniem danych LiDAR z lat 2007 i 2012. Na wykresie widać wyraźnie, jak kształtują się różnice przyrostu drzew w poszczególnych klasach wieku (im starszy drzewostan, tym mniejszy przyrost). Na podstawie uzyskanych wyników obliczono średni roczny przyrost wysokości drzew, który wyniósł 0,33 m.

Wykres obrazuje także opisaną wcześniej tendencję do zaniżania wysokości uzyskanych z danych LiDAR oraz zawyżania wysokości z pomiarów stereofotogrametrycznych.

Wnioski

- ✦ Zarówno lotnicze skanowanie laserowe, jak i stereofotogrametria mają wielki potencjał jako metody zbierania informacji o drzewach i drzewostanach, zwłaszcza w warstwie koron.
- ✦ Na podstawie analizy wysokorozdzielczych zdjęć lotniczych oraz chmury punktów ALS można pozyskać wiarygodne informacje o wysokości drzew i drzewostanów.
- ✦ Lotnicze skanowanie laserowe ma jako technologia wykorzystywana do szacowania wysokości drzew tendencję do zaniżania wysokości, z kolei wysokości pozyskane na podstawie danych



Ryc. 3.

Krzywe wysokości
Tree height curves

stereofotogrametrycznych są lekko zawyżane w stosunku do wysokości uzyskanych podczas pomiarów terenowych.

- ✦ Dane pochodzące z lotniczego skanowania laserowego mogą być z powodzeniem wykorzystywane do obliczenia średniego przyrostu wysokości drzewostanów.
- ✦ Stereofotogrametria, ze względu na nowe możliwości, jakie niesie za sobą wysokorozdzielcza fotografia cyfrowa, a także niższe koszty pozyskania danych (w stosunku do ALS), powinna wrócić do łask leśników.
- ✦ Zdalne metody pomiarowe drzew i drzewostanów – ze względu na szybkość pozyskiwania danych, ich obiektywność i dokładność, a także automatyzację obliczeń oraz spadające koszty pozyskania danych – z pewnością mogą być wykorzystywane w celach inwentaryzacyjnych obszarów leśnych (jako wspomaganie aktualnych narzędzi inwentaryzacyjnych), a w przyszłości mogą nawet zastąpić tradycyjne metody inwentaryzacji lasu.

Literatura

- Baltsavias E. P. 1999. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of photogrammetry and Remote Sensing* 54 (2): 83-94.
- Banin L., Feldpausch T. R., Phillips O. L., Baker T. R., Lloyd J., Affum-Baffoe K., Arets E. J. M. M., Berry N. J., Bradford M., Brienen R. J. W., Davies S., Drescher M., Higuchi N., Hilbert D., Hladik A., Lida Y., Abu Silam K., Kassim A. R., King D. A., Lopez-Gonzalez G., Metcalfe D., Nilus R., Peh K. S.-H., Reitsma J. M., Sonké B., Taedoumg H., Tan S., White L., Wöll H., Lewis S. L. 2012. What controls tropical forest architecture? Testing environmental, structural and floristic drivers. *Global Ecology and Biogeography* 21: 1179-1190.
- Będkowski K. 2008. Fotogrametryczny pomiar wysokości drzew na obrazach z kamery cyfrowej DMC. *Roczniki Geomatyki* 6: 41-48.
- Będkowski K., Adameczyk J., Mikrut S. 2006. Współczesne metody fotogrametrii i ich zastosowanie w leśnictwie. *Roczniki Geomatyki* 4: 55-65.
- Heurich M., Persson A., Holmgren J., Kennel E. 2004. Detecting and Measuring Individual Trees with Laser Scanning in Mixed Mountain Forest of Central Europe Using an Algorithm Developed for Swedish Boreal Forests Conditions. Proc. of the ISPRS working group VII/2 'Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment', Freiburg, Germany. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI (8/W2):* 307-312.
- Heurich M., Weinacker H. 2004. Automated tree detection and measurement in temperate forest of central Europe using laserscanning data. Proceedings of the ISPRS working group on Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment, Germany.
- Hyypä J., Hyypä H., Litkey P., Yu X., Haggrén H., Rönnholm P., Pyysalo U., Pitkänen J., Maltamo M. 2004. Algorithms and methods of airborne laser-scanning for forest measurements. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36: 82-89.

- Hyypä J., Inkinen M. 1999. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The Photogrammetric Journal of Finland* 16: 27-42.
- Jung S., Kwak D., Park T., Lee W., Yo S. 2011. Estimating crown variables of individual trees using airborne and terrestrial laser scanners. *Remote Sensing* 3: 2346-2363.
- King D. A., Clark D. A. 2011. Allometry of emergent tree species from saplings to above-canopy adults in a Costa Rican rain forest. *Journal of Tropical Ecology* 27: 573-579.
- Kraus K., Pfeifer N. 2001. Advanced DTM generation from LiDAR data. *International Archives Of Photogrammetry Remote Sensing And Spatial Information Sciences* 34: 23-30.
- Næsset E. 1997. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 52 (2): 49-56.
- Næsset E. 2002. Determination of mean tree height of forest stands by digital photogrammetry. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17 (5): 446-459.
- Nilsson M. 1996. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. *Remote Sensing of Environment* 56 (1): 1-7.
- 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. *Proceedings of Youth Forum* 38: 27-33.
- Stereńczak K., Kozak J. 2011. Evaluation of digital terrain models generated in forest conditions from airborne laser scanning data acquired in two seasons. *Scandinavian Journal of Forest Research* 26 (4): 374-384.
- Wężyk P., Solecki K. 2008. Określanie wysokości drzewostanów nadleśnictwa Chojna w oparciu o lotniczy skaning laserowy (ALS). *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 18: 663-672.
- Wężyk P., Szostak M., Tompalski P. 2010. Aktualizacja baz danych SILP oraz leśnej mapy numerycznej w oparciu o dane z lotniczego skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 21: 437-446.
- Wężyk P., Tompalski P., Szostak M., Glista M., Pierzchalski M. 2008. Describing the selected canopy layer parameters of the Scots pine stands using ALS data. *SilviLaser*: 636-645.