

**MODELOWANIE CHMURY PUNKTÓW ZE SKANINGU LASEROWEGO
W OBSZARZE KORON DRZEW**

THE LIDAR POINT CLOUD DATA-BASED FOREST CANOPY MODELLING

Piotr Węzyk

Laboratorium GIS i Teledetekcji, Katedra Ekologii Lasu, Wydział Leśny,
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: lotniczy skaningu laserowy (ALS), inwentaryzacja lasu, wysokość drzewa, podstawa korony, powierzchnia i objętość warstwy koron.

STRESZCZENIE: Celem pracy było określenie przydatności i zaproponowanie rozwiązań automatyzacji procesu określania wybranych parametrów taksacyjnych drzewostanów związanych z koronami drzew, w oparciu o dane z lotniczego skaningu laserowego (ALS). Analiza przydatności danych ALS bazuje na pomiarach referencyjnych 432 sosen w obszarze badawczym Milicz (RDLP Wrocław). Osiągnięte wyniki wskazują, iż: (1) wysokość pojedynczych drzew określona na podstawie modelowanej chmury punktów ALS w zależności od użytego algorytmu, prowadzi do niewielkiego zaniżenia wartości (średnia różnica -0.90 m CHM1 lub -0.12 m CHM2); (2) średnia wysokość analizowanych drzewostanów na powierzchniach kołowych określana na podstawie ALS, była wyższa (+0.85 m) od wartości zapisanych w bazie danych SILP (2005) co w efekcie prowadzić może do zaniżenia zasobności drzewostanów w całym obrębie; (3) automatycznie analizowana średnia wysokość drzewostanów sosnowych (95 centyl FE) była wyższa o +0.46 m w stosunku do danych z SILP; (4) automatycznie określona podstawa korony sosny wykazuje błąd zaledwie około 0.56 m; (5) analiza histogramów chmury punktów umożliwiła określenie długości korony z przeszacowaniem o +0.44 m w stosunku do danych referencyjnych; (6) modelowanie warstwy koron otwiera dyskusje na temat homogeniczności jednowiekowych i jednogatunkowych pododdziałów oraz istniejącego podziału przestrzennego. Nowa metoda inwentaryzacji leśnej bazująca na technologii pozyskiwania danych ALS i modelowaniu chmury punktów ma duże szanse na wdrożenie w lasach Polski o powinno przynieść ze sobą wzrost dokładności jak i obniżyć koszty prac urzędniowych.

1. WPROWADZENIE

Wysokość drzewa określana na powierzchni kołowej służącej celom inwentaryzacji lasu a tym samym poznanie tej wartości i jej rozkładu przestrzennego jest jednym z najbardziej istotnych parametrów opisujących drzewostan. Określanie miąższości pojedynczych drzew i całych drzewostanów opiera się na wzorach wykorzystujących właśnie wysokość i średnicę drzewa, stąd dokładność szacowania zapasu drewna jest wprost powiązana z jakością informacji o tych zmiennych. W lasach gospodarczych, szczególnie w jednogatunkowych drzewostanach iglastych odnawianych sztucznie z jednolitego materiału genetycznego, wysokości drzew nie powinny różnić się znacznie od siebie przy założeniu występowania jednakowych warunków siedliskowych i prowadzenia identycznych zabiegów hodowlanych (np. nawożenie, trzebieże). Pomiar

wysokości drzew wykonywany tradycyjnie wysokościomierzem (nawet elektronicznym), obarczony jest błędem instrumentu oraz subiektywizmem wskazania przez operatora wierzchołka drzewa, co w niektórych sytuacjach (duże zwarcie, wietrzna pogoda, pochylenie drzewa) powoduje powstawanie dużych błędów. Pomiar wysokości drzew jest przede wszystkim niezmiernie czasochłonny przez co możliwy jedynie dla niewielkiej, losowo wybranej liczby drzew reprezentującej drzewostan. Inne metody pomiarowe jak fotogrametria lotnicza, znane są od wielu dziesiątków lat ale dotychczas kojarzono je z wysoką pracochłonnością pozyskania danych i ich opracowania. Obecnie metody te stają się jednak coraz bardziej interesujące ze względu na technologię lotniczych kamer cyfrowych i procesu automatycznego spasowania obrazów (ang. *stereomatching*; Baltsavias et al. 2008) prowadzącego do generowania dokładnych modeli powierzchni koron (*DSM*; *CHM* – *Crown Height Model*). Inne technologie z zakresu technik aktywnych, takich jak: radar czy LiDAR (*Light Detection and Ranging*) oferują od kilku lat praktyce leśnej zupełnie nowe podejście do pomiarów wybranych parametrów taksacyjnych i to nie tylko ograniczonych do powierzchni kołowych, na których leśnicy zwykli opisywać cały drzewostan. Dotychczasowe badania nad oceną dokładności laserowego skaningu lotniczego koncentrowały się generalnie na powierzchniach kołowych (*plot level*) jako danych referencyjnych (Means et al. 2000) choć czasami dotyczyły pojedynczych drzew (*tree level*) (Hyypä et al. 2004). Pomiar wysokości drzewostanu za pomocą lotniczego skaningu laserowego był już przedmiotem badań wielu autorów (Næsset 1997, Popescu et al. 2003a, Næsset 2004, Kwak et al. 2007). Lotniczy skaningu laserowy wykorzystywany także bywa do określania innych parametrów drzew, takich jak: wysokość podstawy korony (Næsset & Økland 2002, Hall et al. 2005, Popescu i Zhao 2008), długość korony (Næsset & Økland 2002, Maltamo et al. 2006), średnica korony (Popescu et al. 2003b), zagęszczenie pni w drzewostanie (Riaño et al. 2003), biomasa (Lim & Treitz 2004, Popescu 2007) czy miąższość (Næsset 2004, Hollaus et al. 2007). Celem prezentowanej pracy było przedstawienie możliwości wykorzystania technologii lotniczego skaningu laserowego w procesie automatyzowanego pozyskiwania wybranych parametrów taksacyjnych drzewostanów sosnowych.

2. TEREN BADAŃ

Obiektem testowym były drzewostany nadleśnictwa Milicz (RDLP Wrocław; 51°27' N; 17°12' E), na których od kilku lat prowadzone są badania finansowane przez DGLP a koordynowane przez SGGW w Warszawie nad integracją technologii geomatycznych w zakresie ich wykorzystania w gospodarce leśnej. W pracy prezentowane są wyniki badań uzyskane na podstawie 21 powierzchni kołowych założonych w drzewostanach sosnowych (*Pinus silvatica* L.). W zależności od wieku drzewostanu powierzchnie miały różną wielkość, tj.: od 50 m² (26 lat) do 500 m² (powyżej 100 lat).

3. METODYKA

3.1. Dane referencyjne

Dane referencyjne wykorzystane w pracy pochodziły z kilku źródeł. Jedno z nich najczęściej przywoływane nazwano Forest inv., gdyż pomiar ten został wykonany zgodnie z Instrukcją Urządzania Lasu (IUL PGLP 2003) w 2006 roku na 30 powierzchniach kołowych w Miliczu, dostarczając takich parametrów jak: gatunek drzewa, średnica pnia (DBH) na wysokości 1.3m od gruntu, wysokość drzewa, długość korony, współrzędne korony (rzut korony na 8 kierunkach), współrzędne pni i środka korony z pomiaru biegunowego. Wysokość drzew określana była przy wykorzystaniu wysokościomierza Vertex III (Haglöf) z nominalną dokładnością 0.1 m. Inny zestaw danych referencyjnych stanowiła baza danych SILP\LAS wypełniona atrybutami w 2005 roku, kiedy wykonywany był standardowy plan urządzania lasu i przeprowadzono pomiary inwentaryzacyjne. Identyfikacja pojedynczych koron drzew podczas analizy ALS była możliwa dzięki naziemnym pomiarom biegunowym ze środków powierzchni, których lokalizację wyznaczono pomiarem dGPS (Trimble Pathfinder ProXRS) z wykorzystaniem stacji bazowej we Wrocławiu (ASG-PL). Trzeci zestaw danych referencyjnych stanowiły pomiary wykonywane technologią naziemnego skaningu laserowego w 2006 i 2007 roku (Wężyk et al. 2007).

3.2. Dane ALS

Nalot, podczas którego pozyskano dane ALS, zrealizowano w lipcu 2007 wykorzystując technologię firmy TopoSys (Falcon II) tj., skaner typu światłowodowego (*glas fiber*) z mimośrodowym przesunięciem wysyłanego sygnału (*swing mode*). Dane pozyskiwano z wysokości względnej około 550 metrów. Średnia gęstość punktów osiągnęła ok. 14 m^{-2} (9÷18). Pojedyncze skany (szeregi nalotu) dostarczono jako dane typu RAW w formacie ASCII z podziałem na pierwsze (FE) oraz ostatnie (LE) odbicie sygnału lasera.

3.5. Oprogramowanie i oprzyrządowanie

W projekcie wykorzystywano oprogramowanie Terrascan i Terramodeler (Terrasolid Ltd.) do przetwarzania i klasyfikacji chmury punktów, natomiast do uzyskania poszczególnych wskaźników dla warstwy koron drzew (tzw. *canopy metrics*) - pakiet programów FUSION (McGaughey 2007) oraz LASEdit (Cloud Peak) przy kontroli poprawności plików w formacie *.LAS. Oprogramowanie ArcViewGIS 9.1 (ESRI) stosowano do analiz przestrzennych GIS a Statistica 8.0 (StatSoft Inc.) w analizie regresji i do przeprowadzenia testów istotności.

3.6. Przygotowanie danych ALS do automatycznego modelowania wysokości

Modele NMT (*DTM*) oraz NMPT (*DSM*) generowano z danych RAW (ASCII) ograniczonych do obszarów analizowanych wydzieleni leśnych (osobno FE oraz LE). W tym celu użyto wektora Leśnej Mapy Numerycznej (LMN), który jednak musiano zmodyfikować w oparciu o model DSM i tzw. *true ortho* wygenerowane w oparciu o obraz ze skanera liniowego (piksel 25cm; CIR) z systemu FALCON. Dane ALS

przekonwertowano do formatu *.LAS (binarny format wymiany danych ASPRS) z zachowaniem informacji o kolejności odbicia (*return number*) i dalej do formatu *.LDA w celu przeprowadzenia analiz nad wskaźnikami dla warstwy koron drzew. Wszystkie dane jakie przetwarzano w projekcie zostały przetransformowane do układu współrzędnych PUWG 1992. Chmura punktów została poddana normalizacji i modelowaniu do znormalizowanego NMPT (ang. *nDSM*; w przypadku koron nazywany Crown Height Model = CHM). Model terenu w tworzony był automatycznie w oprogramowaniu Terrasolid oraz FUSION (McGaughey 2007) wykorzystując algorytmy opisane przez Kraus i Pfeifer (1998). Model CHM był zapisywany do formatu *.dtm (Mc Gaughey 2007). W celu zautomatyzowania określania parametru wysokości całych drzewostanów wykorzystano 95 percentyl FE.

3.7. Automatyczne określenie podstawy korony sosny i jej długości w oparciu o histogram ALS

Na podstawie histogramów ilości punktów ALS w warstwach o grubości 0.5m dokonano oceny położenia podstawy korony pojedynczych sosen oraz dla całego wydzielenia. Długość korony drzewa jest definiowana jako odległość pomiędzy wierzchołkiem a podstawą korony. O ile sprawa położenia wierzchołka nie stanowi większego problemu to, wskazanie podstawy korony obarczone jest dużym subiektywizmem.

3.6. Modelowanie powierzchni koron – wysokości pojedynczych drzew.

Modelowanie powierzchni tworzonej przez korony sosen (ang. *forest canopy*) doprowadziło do powstania dwóch różnych powierzchni, tj.: CHM1 oraz CHM2 zapisanych do formatu *.dtm. Modele różnią się parametrami algorytmu filtrującego odpowiedzialnego za wygładzanie tworzonych powierzchni. Model koron CHM1 wygenerowano bez opcji uwzględniania lokalnych minimów i maksimów w chmurze punktów, w dodatku w opcji dwóch filtrów wygładzających. Model CHM2 generowano w opcji z uwzględnianiem lokalnych maksimów i minimów w celu bardziej realistycznej wizualizacji drzewostanów.

3.7. Obrys koron drzew

Bardziej szczegółowe i poprawne geometrycznie kontury koron niż te pochodzące z prac terenowych (Forest inv.), otrzymano na drodze przetwarzania danych naziemnego skaningu laserowego (ang. *Terrestrial Laser Scanning = TLS*). Wykorzystano je w analizach określania gęstości punktów w koronach poszczególnych drzew jak również najwyższego położonego punktu korony (*maxPointZ*). W ten sam sposób określono podstawę korony drzewa na drodze analizy histogramów tworzonych z chmury ALS wycinanej pojedynczymi konturami koron pochodzącymi z TLS. Sposób ten wymagał zintegrowania TLS oraz ALS co udało się przeprowadzić na drodze manualnej.

4. WYNIKI

3.2. Wysokość drzew

W pierwszej kolejności wyniki pomiaru wysokości otrzymane różnymi metodami (SILP, Forest Inv., TLS, CHM1 oraz CHM2) poddano statystycznej analizie wariancji. Sprawdzono rozkłady normalności testami nieparametrycznymi (test Friedmana, ANOVA dla wielu zmiennych oraz test Wilcoxon dla porównania dwóch). Analizując wszystkie sosny (bez podziału na klasy wieku) stwierdzono pojawianie się wysokich oraz wysoce istotnych różnic w przypadku porównywania grup metod: tradycyjnego pomiaru hipsometrem (Forest Inv. 2006) oraz metodami TLS i ALS (CHM1 oraz CHM2) jak również SILP oraz CHM2 (Tabela 1).

Tabela 1. Statystyki wysokości drzew (h_i) określonej na podstawie wybranych źródeł danych. (**) – wysoce istotne różnice; $p < 0.01$; (*) – istotne różnice, $0.01 < p < 0.05$; (n) – brak istotności; razem 432 drzew

		F. INV	SILP	TLS	CHM1	CHM2
F. INV	średnia różnica [m]		-1.14 (**)	-0.98 (**)	-0.90 (**)	-0.12 (n)
	R ²		0.73	0.81	0.81	0.80
	odch. std. dla różnicy		2.15	2.18	1.77	1.81
SILP	średnia różnica [m]			0.02 (n)	0.13 (n)	0.85 (*)
	R ²			0.96	0.96	0.95
	odch. std. dla różnicy			1.01	0.94	1.02
TLS	średnia różnica [m]				0.08 (n)	0.83 (**)
	R ²				0.95	0.94
	odch. std. dla różnicy				0.86	0.94
CHM1	średnia różnica [m]					0.75 (**)
	R ²					0.98
	odch. std. od średniej					0.58

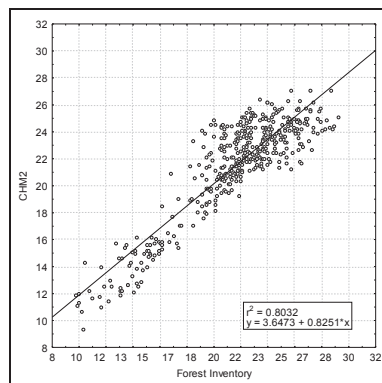
W przypadku porównywania tradycyjnych metod pomiarowych (Forest inv. - Vertex; Haglöf) z technologią ALS zaobserwowano pewien wyraźny trend. Rysunek 1 oraz Tabela 2 jasno dokumentują, iż metoda ALS (CHM1 oraz CHM2) pomiaru wysokości pojedynczych drzew prowadzi do zaniżania wartości tej zmiennej o około -0.90 m (SD=1.77 m) w przypadku wymodelowanej powierzchni CHM1 oraz -0.12 m (SD=1.81 m) w przypadku powierzchni CHM2. Różnica pomiędzy dwoma powierzchniami CHM2 i CHM1 wyniosła średnio w przypadku wszystkich analizowanych drzew około 0.75m przy czym CHM2 generowana w opcji uwzględniania lokalnych maksimów i minimów miała wyższe bardziej zbliżone do referencji wartości. Dodatkowo przeprowadzono analizę na zestawie punktów pierwszego odbicia (FE) w celu określenia rzeczywistych najwyższych punktów w chmurze ALS, która wyraźnie potwierdziła, iż powierzchnia CHM2 była bliżej do najwyższego punktu (+0.20 m) niż CHM1 (-0.50 m). Średnia wysokość sosen odczytana na podstawie bazy danych SILP (2005) była niższa średnio o 1.14m niż wartości zmierzone podczas prac terenowych w 2006 roku (Forest inv.), co może wskazywać na niedokładność wcześniejszych pomiarów terenowych (lokalizacja miejsc pomiarów w roku 2005 nie jest znana). Średni roczny przyrost wysokości wyniósł około 0.15±0.20 m więc nie jest to jedyny powód niezgodności tych dwóch pomiarów. Średnia

różnica pomiędzy pomiarami z 2006 roku (Forest inv.) a wynikami TLS (2006) wskazuje na niedoszacowanie przez naziemny skaningu laserowego wartości wysokości (-0.98 m) zakładając oczywiście całkowitą poprawność danych uzyskanych wysokościomierzem. Kluczowym w procesie określania wysokości metodami ALS, wydaje się być dobór algorytmu do generowania NMT. W przypadku występującego gęstego podrostu czy podszytu lub też niewielkiej ilości punktów (LE) na gruncie ze względu na bardzo gęste sklepienie, może mieć miejsce błędne generowanie DTM a tym samym niedoszacowanie wysokości drzewa (Pyysalo 1999). Drugi ważny moment wiąże się z generowaniem powierzchni koron (CHM). Wynik porównania najwyższego punktu z chmury ALS wskazuje, iż CHM2 lepiej aproksymuje model powierzchni koron (-0.12 m) co oczywiście skutkuje też większymi różnicami z wartościami SILP (+0.85 m; $R^2=0.95$; SD= 1.02 m; Tabela 1). Przeprowadzona analiza regresji dla wszystkich par metod pomiarowych wykazała, iż najniższa wartość współczynnika determinacji ($R^2=0.73$) została wykazana dla zmiennych: SILP\Forest Inv. Zadawalająco bardzo wysokie wskaźniki $R^2=0.95$ uzyskano w analizie regresji obu zmiennych CHM1 i CHM2 w stosunku do zmiennej wyjaśniającej SILP (2005). Porównując wyniki otrzymane dla obiektu Milicz nie zauważono dużych różnic w stosunku do rezultatów prac innych autorów, którzy w większości przypadków wykazują wartości niedoszacowania wysokości przez ALS (Hyypä et al. 2004, Maltamo et al. 2004, Rönnholm et al. 2004, Yu et al. 2004, Andersen and Breidenbach 2007) lub zbliżone do danych referencyjnych (Næsset 2004). Tylko wyniki osiągnięte przez Næsset oraz Økland (2002) a także McGaughey et al. (2004), wskazują na niewielkie przeszacowanie przez ALS w stosunku do danych referencyjnych (odpowiednio +0.18 m oraz +0.29 m).

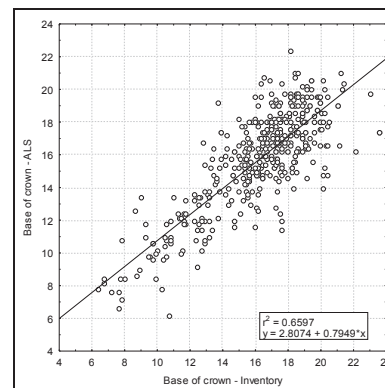
3.3. Podstawa i długość korony (L)

Średnia różnica w określaniu podstaw koron drzew pomiędzy metodą ALS a referencyjnym Forest inv. wyniosła +0.87 m, co wskazuje niedoszacowanie przez skaningu lotniczy odczytu podstawy korony (SD=1.5 m). Analiza histogramów dla przykładowego wydzielenia 214c (19.89 ha) wykazała, iż 82,30 % punktów (z ponad 2.5 mln w tym wydzieleniu) pozostaje w warstwie koron (81,8% FE; 82,9 % LE) a do gruntu dochodzi jedynie 12.5% wszystkich impulsów (12,3% FE; 12,8% LE). Analiza regresji (Rys.1; $R^2=0,66$) wskazuje na możliwość skonstruowania odpowiedniego wzoru do skorygowania odczytu podstawy korony z chmury punktów ALS, co pozwoliło by na bardziej precyzyjne szacowanie takich parametrów jak długość korony, biomasa korony, etc. Przyczyn problemu nieprawidłowego określenia podstawy korony może być wiele, a zaliczyć do nich można przede wszystkim: zwarcie, stan aparatu asymilacyjnego a także występowanie na pniach martwych gałęzi (Chasmer et al. 2006). Poza tym powierzchnie kołowe nie koniecznie muszą idealnie reprezentować cały drzewostan co świadczyłoby o subiektywności procesu ich wyboru. Zagadnienie określania wysokości podstawy korony było również przedmiotem badań Næsset i Økland (2002), Hall et al. (2005) oraz Popescu i Zhao (2008). Autorzy ci otrzymali zbliżone współczynniki R^2 w analizie regresji wynoszące odpowiednio: 0.53, 0.80 oraz 0.79. Natomiast Chasmer et al. (2006) w swych badaniach stwierdzili zawyżanie wysokości podstawy korony średnio o 1.4 m. Na dokładność określenia długości korony prawdopodobnie w większym stopniu wpływa błąd położenia podstawy korony niż szacowania wysokości (H) drzewa. Średnia różnica długości koron określana automatyczna metodą dla pojedynczych koron drzew w porównaniu z danymi referencyjnymi (Forest inv.) wyniosła +0.40 m, co oznaczać może generalnie przeszacowanie dla metody ALS. Dla młodszych

drzewostanów (<80 lat) różnica w długości korony dla analizowanych wydziałów wyniosła zaledwie 0.05m za to w starszych (>80 lat) aż 1.34 m. Analiza regresji wykazała wartość współczynnika $R^2=0.66$ dla równania opisującego długość korony określaną z ALS w porównaniu do tradycyjnych naziemnych metod stosowanych przez urządzenie lasu (Rys.2). Podobną dokładność dla długości koron uzyskał w swych badaniach Næsset i Økland (2002), którzy dla równia regresji liniowej otrzymali wartość współczynnika $R^2=0.51$.



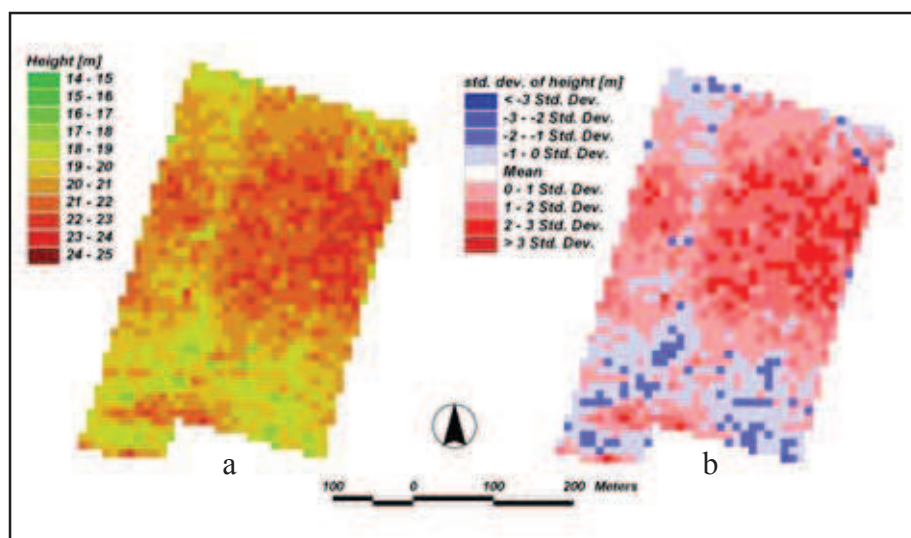
Rys. 1. Analiza regresji wysokości sosen (h_i) określanej w terenie (Forest inv.) w stosunku do zmiennej wyjaśnianej CHM2 (ALS)



Rys. 2. Wykres regresji liniowej dla podstawy korony sosny określanej na podstawie ALS (referencja = Forest inv. 2006)

3.4. Homogeniczność wysokości w drzewostanie

Średnia wysokość drzewostanów w analizowanych wydziałach określona na podstawie 95% percentyla bazującego na chmurze punktów ALS (tylko FE) różni się od pochodzącej z baz SILP (2005 rok o +0.47 m; SD=0.60). Różnica wysokości pomiędzy wartością średnią dla pododdziału a średnią z powierzchni kołowych wyniosła -0.37 m (SD=0.95). Rozkład przestrzenny wysokości w przykładowym drzewostanie 232b drzewostanie zaprezentowano na Rysunku 3 (H średnia = 20.96). Jest rzeczą znaną, iż cecha pierśnica (*BHD*) określana dla całego drzewostanu ma charakter rozkładu normalnego i podobnie rzecz ma się z mocno skorelowaną wysokością drzew, tyle że w wielu przypadkach jej rozkład wskazuje na dużą niehomogeniczność przestrzenną (lokalizację). Taka sytuacja ma miejsce pomimo jednowiekowego i jednogatunkowego charakteru drzewostanu nawet przy identycznych warunkach siedliska. Wynika to ze zmienności osobniczej, mikrosiedliska (substancji odżywczych, wilgotności), obecności luk, ilości energii słonecznej docierającej do korony i gleby, wnikania wiatru, deszczu, immisji itp.



Rys. 3. Wysokość drzewostanu (a) oraz odchylenie standardowe (b) od średniej w pododdziale 232b

5. WNIOSKI

Prezentowane badania poruszyły wiele istotnych pytań co do przyszłości stosowanych obecnie metod oraz możliwości wdrażania nowych opartych o technologie lotniczego skaningu laserowego (ALS). Podważyły tym samym w pewnym stopniu uznawanie dotychczasowych tradycyjnych metod inwentaryzacji lasu jako jedynych prawdziwych danych referencyjnych. Poszukując alternatyw do obecnych rozwiązań trzeba mieć na uwadze, iż tradycyjne metody są niezmiernie czasochłonne i stosunkowo subiektywne (np. wysokości). Technologia ALS po raz pierwszy oferuje leśnikom możliwość automatycznego określania wysokości drzew (oraz innych wybranych cech taksacyjnych) nie tylko w obrębie niewielkiej powierzchni kołowej ale w całym wydzieleniu. Osiągnięte w pracy wyniki wskazują iż:

- wysokość pojedynczych drzew określona na podstawie modelowanej chmury punktów ALS prowadzi to stosunkowo niewielkiego zaniżenia tej wartości (średnia różnica -0.90 m lub -0.12 m w zależności od algorytmu użytego do jego generowania);
- średnia wysokość drzewostanu określana na podstawie zNMPT była wyższa ($+0.85$ m) od wartości odczytanej z bazy danych SILP, co może prowadzić do stałego zaniżania zasobności drzewostanów w całym obrębie Milicz;
- średnia wysokość automatycznie analizowanych drzewostanów sosnowych (jako 95% percentyl z FE) była przewyższała o $+0.46$ m dane z baz SILP\LAS;
- przy automatycznie określonej podstawie korony sosny należy liczyć się z błędem przeszacowania około 0.56 m;
- analiza histogramów chmury punktów umożliwiła określenie długości korony (L) z przeszacowaniem około $+0.44$ m w stosunku do danych referencyjnych, oraz

- modelowanie warstwy koron otwiera dyskusje na temat rzeczywistej homogeniczności jednowiekowych i jednogatunkowych pododdziałów oraz związanego z nią istniejącego podziału przestrzennego.

Należy przewidywać, iż w niedalekiej przyszłości z pewnością zostanie wdrożona nowa metoda inwentaryzacji lasu bazująca na automatycznych metodach modelowania chmury punktów ALS, a wraz z nimi pojawią się zupełnie nowe parametry opisujące przestrzeń 3D obszarów leśnych. Technologia ta poza wzrostem dokładności i obiektywności pozyskiwanych danych, jak również ich powtarzalności przyniesie także obniżenie kosztów metod tradycyjnych i znacznie skróci czas wykonywania opracowań.

6. LITERATURA

Andersen H.-E., Breidenbach J., 2007. Statistical properties of mean stand biomass estimators in a lidar-based double sampling forest survey design. Rönnholm P., Hyypä H. i Hyypä J. (eds.): *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*. Espoo, Finland. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XXXVI, Part 3 / W52.

Andersen H. E., Reutebuch S. E., Mcgaughey R. J., 2006. A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne lidar and conventional field methods. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol: 32 (5), 355-366.

Avery T. E., Burkhart H. E., 2002. Forest measurements. McGraw-Hill.

Chasmer L., Hopkinson C., Treitz P., 2006. Investigating laser pulse penetration through a conifer canopy by integrating airborne and terrestrial lidar. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol: 32 (1-2), 116-125.

Hall S. A., Burke I. C., Box D. O., Kaufmann M. R., Stoker J. M., 2005. Estimating stand structure using discrete-return lidar: An example from low density, fire prone ponderosa pine forests. *Forest Ecology and Management*, Vol: 208 (1-3), 189-209.

Hollaus M., Wagner W., Maier B. & Schadauer K., 2007. Airborne laser scanning of forest stem volume in a mountainous environment. *Sensors*, Vol: 7 (8), 1559-1577.

Hyypä J., Hyypä H., Litkey P., Yu X., Haggrén H., Rönnholm P., Pyysalo U., Pitkanen J. & Maltamo M., 2004. Algorithms and methods of airborne laser-scanning for forest measurements. Thies M., Koch B., Spiecker H. i Weinacker H. (eds.): *Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment: Proceedings of the ISPRS Working Group VIII/2*. Freiburg, Germany. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and the Spatial Information Sciences. XXXVI-8/W2.

IUL PGLP, 2003. *Część 1. Instrukcja sporządzania planu urządzania lasu dla nadleśnictwa. Załącznik do zarządzenia nr 43 dyrektora generalnego lasów państwowych z dnia 18 kwietnia 2003 r.* Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe. Warszawa.

Kraus K. & Pfeifer N., 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol: 53 (4), 193-203.

- Kwak D. A., Lee W. K., Lee J. H., Biging G. S. & Gong P., 2007. Detection of individual trees and estimation of tree height using LiDAR data. *Journal of Forest Research*, Vol: 12 (6), 425-434.
- Laar A. V. & Akca A., 1997. Forest mensuration. Cuvillier Verlag. Gottingen.
- Lim K. S. & Treitz P. M., 2004. Estimation of above ground forest biomass from airborne discrete return laser scanner data using canopy-based quantile estimators. *Scandinavian Journal of Forest Research*, Vol: 19 (6), 558-570.
- Maltamo M., Hyyppä J. & Malinen J., 2006. A comparative study of the use of laser scanner data and field measurements in the prediction of crown height in boreal forests. *Scandinavian Journal of Forest Research*, Vol: 21 (3), 231-238.
- Maltamo M., Mustonen K., Hyyppä J., Pitkänen J. & Yu X., 2004. The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in a boreal nature reserve. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol: 34 (9), 1791-1801.
- McGaughey R. J., 2007. Fusion/ldv: Software for lidar data analysis and visualization. Software manual. USDA Forest Service. Pacific Northwest Research Station.
- McGaughey R. J., Carson W., Reutebuch S. & Andersen H.-E., 2004. Direct measurement of individual tree characteristics from lidar data. *Proceedings of the Annual ASPRS Conference*. Denver. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing.
- Means J. E., Acker S. A., Fitt B. J., Renslow M., Emerson L. & Hendrix C. J., 2000. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning lidar. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol: 66 (11), 1367-1371.
- Næsset E., 1997. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol: 52 (2), 49-56.
- Næsset E., 2004. Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research*, Vol: 19 (2), 164-179.
- Næsset E. & Økland T., 2002. Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve. *Remote Sensing of Environment*, Vol: 79 (1), 105-115.
- Popescu S. C., 2007. Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar. *Biomass and Bioenergy*, Vol: 31 (9), 646-655.
- Popescu S. C., Wynne R. H. & Nelson R. F., 2003a. Estimating plot-level tree heights with lidar: Local filtering with a canopy-height based variable window size. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol: 37 (1-3), 71-95.
- Popescu S. C., Wynne R. H. & Nelson R. F., 2003b. Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol: 29 (5), 564-577.
- Popescu S. C. & Zhao K., 2008. A voxel-based lidar method for estimating crown base height for deciduous and pine trees. *Remote Sensing of Environment*, Vol: 112 (3), 767-781.

Pyysalo U., 1999. A method to create a three-dimensional forest model from laser scanner data. *The Photogrammetric Journal of Finland*, Vol: 17 (1), 34-42.

Riaño D., Meier E., Allgöwer B., Chuvieco E. & Ustin S. L., 2003. Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling. *Remote Sensing of Environment*, Vol: 86 (2), 177-186.

Rönholm P., Hyypä J., Hyypä H., Haggrén H., Yu X. & Kaartinen H., 2004. Calibration of laser-derived tree height estimates by means of photogrammetric techniques. *Scandinavian Journal of Forest Research*, Vol: 19 (6), 524-528.

Yu X., Hyypä J., Kaartinen H. & Maltamo M., 2004. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, Vol: 90 (4), 451-462.

THE LIDAR POINT CLOUD DATA-BASED FOREST CANOPY MODELLING

KEY WORDS: ALS, forest inventory, tree height, canopy base, canopy surface and volume

Summary

The study was aimed at determining the utility of and to improve the understanding of the airborne laser scanning (ALS) technology in acquisition of selected parameters of canopy layers for individual trees and whole stands. This approach, based on ALS data (TopoSys fiber scanner; swing mode + optical line scanner), was compared with reference data drawn from a forest inventory (432 Scots pines). The study showed that: (1) the height of a single tree, as derived from ALS data, leads to underestimation (mean difference -0.90 m or +0.12 m depending on CHM generation algorithm); (2) the mean stand height was higher (+0.85 m) than the height recorded in the SILP database, which may result in underestimation of the timber volume in the entire Milicz forest district; (3) the stand mean height (understood as 95th percentile of the FE point cloud) was +0.46 m higher than the height recorded in the SILP inventory database; (4) it was possible to estimate the canopy base with 0.56 m overestimation; (5) the canopy length as measured during the forest inventory was +0.44 m lower compared to the ALS data (histogram analysis); (6) the homogeneity of a contemporaneous-pine stand is questionable. In a very near future, a new approach to the forest inventory, supported by ALS data, will be presented as a list of new parameters and guidelines.

dr inż. Piotr Wężyk
e-mail: rlwezyk@cyf-kr.edu.pl
tel. +48-12-6625082
faks:+48-12-6625082