

**DOKŁADNOŚĆ OKREŚLENIA WYSOKOŚCI DRZEW NA PODSTAWIE
NUMERYCZNEGO MODELU KORON DRZEW OPRACOWANEGO
Z WYKORZYSTANIEM DANYCH LOTNICZEGO SKANOWANIA
LASEROWEGO**

**ACCURACY OF TREE HEIGHT ESTIMATION USING LIDAR DATA-
DERIVED DCM**

Urszula Marmol¹, Krzysztof Będkowski²

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

² Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

SŁOWA KLUCZOWE: DTM, DSM, DCM, lotnicze skanowanie laserowe, wysokość drzew, dokładność

STRESZCZENIE: Wysokość drzew i drzewostanu jest ważnym elementem opisującym przestrzeń leśną. W artykule przedstawiono wyniki badań nad zastosowaniem danych skanowania laserowego do wyznaczania wysokości pojedynczych drzew. Badania prowadzono na powierzchniach próbnych rozmieszczonych w uroczysku leśnym Głuchów, należącym do Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Dla obszaru badawczego zostały wykonane dwa naloty – w okresie wiosennym i letnim, z wykorzystaniem systemu FALCON II (TopoSys, 2008). Numeryczny model pokrycia terenu (DSM) interpolowano z wykorzystaniem pierwszego echa impulsu lasera. Istotnym elementem badań było także opracowanie numerycznego modelu terenu (DTM). W tym celu konieczne było wyodrębnienie w zbiorze punktów ostatniego echa, punktów położonych na powierzchni topograficznej. Wykorzystano dwie metody filtracji: algorytm częstotliwościowy oparty na transformacji FFT (Marmol, 2005) i algorytm aktywnego modelu TIN (Axelsson, 2000). Stwierdzono, że zastosowane algorytmy dla znacznej części badanego obszaru we właściwy sposób przeprowadziły selekcję na punkty stanowiące elementy pokrycia i punkty terenowe. Największe błędy pojawiły się na terenach porośniętych niską, gęstą roślinnością, gdyż zostały one w całości zaklasyfikowane do powierzchni topograficznej. Konieczna stała się ręczna korekta uzyskanych rezultatów i usuwanie błędnie zaklasyfikowanych punktów. Prace badawcze zostały przeprowadzone na dwóch polach testowych. Wyznaczono wysokość pojedynczych drzew, z wykorzystaniem wyłącznie danych laserowych, a następnie porównano je z wynikami kontrolnych pomiarów terenowych. Dla pierwszego pola testowego satysfakcjonujące wyniki otrzymano na podstawie numerycznego modelu koron drzew (DCM), który utworzono jako różnicę modeli DSM i DTM. Wartość średnia odchyłek wyniosła $-0,623$ m. Na drugim polu testowym model DCM wygładzono z wykorzystaniem filtru Gaussa, po czym zastosowano segmentację wododziałową, co umożliwiło wydzielenie zasięgu koron pojedynczych drzew. Wysokość każdego drzewa określono jako wartość maksymalną w granicach wyznaczonej korony. Wartość tą traktowano jako wysokość drzewa z pomiaru laserowego i porównano z niezależnym pomiarem terenowym. Uzyskano wartość średnią odchyłek równą $-0,273$ m.

1. WPROWADZENIE

Pomiar laserowy dostarcza informacji zarówno o powierzchni topograficznej, jak również o elementach pokrycia terenu (budynki, roślinność), w postaci trójwymiarowej, nieregularnej „chmury punktów”. W zależności od zastosowań i indywidualnych potrzeb konieczne jest wyodrębnienie punktów powiązanych wyłącznie z powierzchnią topograficzną – DTM, lub punktów opisujących elementy pokrycia – DSM.

Modele DSM oraz DTM mogą być wykorzystane do wyznaczania wysokości drzew lub przeciętnej wysokości drzewostanów. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki określania wysokości pojedynczych drzew, samotnie rosnących wśród pól. Wyboru tych drzew dokonano w celu zagwarantowania pewności ich poprawnego rozpoznania zarówno w terenie, jak i na posiadanych materiałach fotogrametrycznych - zdjęciach lotniczych, chmurach punktów ze skanowania laserowego i in. Założono, że uzyskane wyniki pozwolą wnioskować o dokładności określania wysokości drzew w drzewostanach. W badaniach zastosowano prosty i efektywny algorytm generowania DSM, a także dwa algorytmy generowania DTM – algorytm częstotliwościowy oparty na FFT oraz algorytm aktywnego modelu TIN.

2. GENEROWANIE NUMERYCZNEGO MODELU POKRYCIA TERENU

Numeryczny model pokrycia terenu (ang. *DSM*) został wygenerowany z wykorzystaniem pierwszego echa impulsu laserowego. W celu wyznaczenia punktów odpowiadających elementom pokrycia zastosowano algorytm filtracji, którego pierwszym etapem było usunięcie obserwacji odstających, tzn. błędnie zarejestrowanych odbić od ptaków, chmur itp. Badany obszar został podzielony na kwadraty o rozmiarze 5 m × 5 m. Dla każdego fragmentu został zastosowany filtr medianowy. Następnie dla wszystkich punktów laserowych została określona odległość od powierzchni, będącej wynikiem filtracji. Punkty przekraczające ustaloną wartość tolerancji były usuwane ze zbioru.

Kolejnym etapem był wybór punktów stanowiących pokrycie terenu. Ustalono wstępnie, że w celu uzyskania wymaganej w projekcie dokładności, oczko generowanej siatki DSM powinno być wielkości 0,5 m × 0,5 m. W związku z tym dla wybranego interwału dokonano wyboru punktu najwyższego, jako prawdopodobnego punktu pokrycia. Do ustalenia wartości rzędnych w węzłach siatki zastosowano metodę najbliższego sąsiada.

3. GENEROWANIE NUMERYCZNEGO MODELU TERENU

W procesie generowania numerycznego modelu terenu wykorzystano dwie metody filtracji danych laserowych: algorytm częstotliwościowy oparty na transformacji FFT (Marmol, 2002) i algorytm aktywnego modelu TIN (Axelsson, 1999, 2000). Algorytm częstotliwościowy, opracowany w Zakładzie Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH, oparty jest na teorii przetwarzania sygnałów cyfrowych. Szczegółowy opis teoretyczny zastosowanego algorytmu można znaleźć w (Marmol, 2005). Algorytm aktywnego modelu TIN został rozwinięty na Wydziale Geodezji

i Fotogrametrii w Królewskim Instytucie w Sztokholmie. Algorytm ten zastosowano w komercyjnym oprogramowaniu TerraScan (TerraScan, 1999).

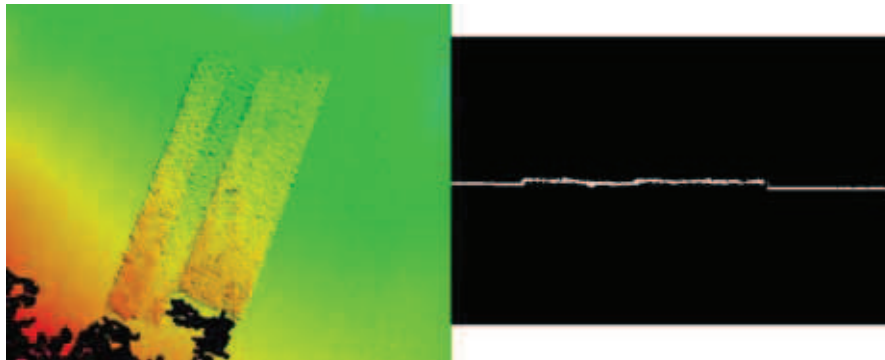
Numeryczny model terenu wygenerowano na podstawie współrzędnych punktów odbić promieni laserowych, tworzących tzw. ostatnie echo. Jako pierwszą metodę filtracji zastosowano algorytm częstotliwościowy. Ustalono empirycznie następujące parametry: częstotliwość odcięcia $f_c = 0,05 \text{ m}^{-1}$, rząd filtru 20 m. Przeprowadzono dodatkowo proces filtracji z wykorzystaniem algorytmu aktywnego modelu TIN. Dla badanego obszaru przyjęto kąt iteracyjny równy 5° , gdyż teren jest równinny. Długość iteracyjną określono na 1,5 m.

Szczegółowa analiza dokładności opisanych powyżej algorytmów filtracji, wraz z opisem teoretycznym metod i znaczeniem poszczególnych parametrów, została zawarta w odrębnej publikacji [Piechocka et al., 2004].

W niniejszych pracach badawczych weryfikacja uzyskanych modeli DTM polegała na wizualnej ocenie pojedynczych profili. Stwierdzono, że zastosowane algorytmy dla znacznej części badanego obszaru we właściwy sposób przeprowadziły selekcję na punkty stanowiące elementy pokrycia (DSM) i punkty terenowe (DTM).

Analizując obszary zabudowy rozproszonej stwierdzono, że pojedyncze budynki zostały w prawidłowy sposób wyeliminowane zarówno przez algorytm częstotliwościowy jak i algorytm aktywnego modelu TIN.

Automatyczna filtracja okazała się jednak nieskuteczna dla terenów porośniętych gęstą, niską roślinnością, ponieważ zostały one w całości zaklasyfikowane do powierzchni topograficznej. Na rysunku 1 widać, że brak jest odbić impulsu lasera od punktów, które można by uznać za rzeczywistą powierzchnię terenu.



Rys. 1. Błędy DTM. Obszar gęstej niskiej roślinności został w całości zaklasyfikowany do powierzchni topograficznej

Konieczna stała się ręczna korekta uzyskanych rezultatów i usuwanie błędnie zaklasyfikowanych punktów. Eliminacja punktów przyczyniła się do powstania obszarów, niekiedy dość rozległych, pozbawionych punktów terenowych. W efekcie wynik interpolacji regularnej siatki DTM dla tych rejonów jest niepewny, bowiem wykorzystano odległe punkty, co mogło zafałszować przebieg powierzchni topograficznej.

Kolejna grupa obiektów, która podlegała weryfikacji to pojedyncze drzewa. W większości przypadków drzewa, ze względu na jednoznaczną identyfikację w zbiorze surowych danych laserowych, zostały w prawidłowy sposób odfiltrowane przez obydwa algorytmy. Błędy pojawiły się w pojedynczych przypadkach i związane były z przebiegiem powierzchni topograficznej (linie nieciągłości) nie zaś z problemem identyfikacji konkretnego drzewa. Szczegółowo problem ten został opisany w rozdziale 4.1.

Przeanalizowano także próbki pokryte gęstą wysoką roślinnością (korony drzew liściastych). Oba algorytmy w tym przypadku miały problem z identyfikacją prawidłowej powierzchni topograficznej i w wielu przypadkach korony niższych drzew i krzewów zostały błędnie włączone do zbioru punktów terenowych. Korzystniejszym rozwiązaniem okazał się algorytm aktywnego modelu TIN, który generował mniejsze błędy niż algorytm FFT. Jednakże w obydwu przypadkach konieczna była ręczna korekta punktów na podstawie wizualnej analizy poszczególnych profili.

4. DOKŁADNOŚĆ WYZNACZENIA WYSOKOŚCI POJEDYNCZYCH DRZEW

W ramach projektu badawczego (Będkowski et al., 2008) wykonano skanowanie laserowe obszaru o powierzchni około 50 km². Do omawianych badań wybrano drzewa rosnące na dwóch rozłącznych obszarach testowych.

4.1. Obszar testowy nr 1

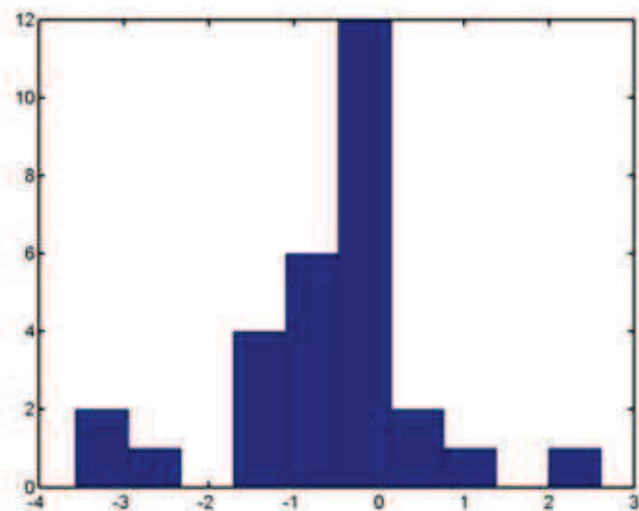
Pole testowe nr 1 zlokalizowane jest w północnej części obszaru badawczego. Są to głównie pola uprawne, z elementami zabudowy i fragmentem lasu w części południowej. Na obszarze tym znajduje się wiele pojedynczych drzew, które zostały wykorzystane w procesie weryfikacji przedstawionych powyżej algorytmów.

Wysokość drzew określono poprzez wyznaczenie różnicy pomiędzy wygenerowanymi modelami DSM i DTM. Uzyskane wyniki zostały porównane z danymi kontrolnymi, czyli zbiorem wysokości drzew, pomierzonych niezależnie w terenie. Pomiar w terenie wykonano za pomocą stosowanego w leśnictwie wysokościomierza SUUNTO (model PM-5/1520P).

Na polu testowym było zlokalizowanych 29 drzew kontrolnych. Były to pojedyncze drzewa na obszarze upraw rolnych. Histogram rozkładu odchylek (rys.2) uwidacznia wyraźną tendencję w kierunku wartości ujemnych. Wartość średnia odchyłek wynosi $-0,623$ m. Można zatem mówić o błędzie systematycznym, tzn. wysokości drzew wyznaczone z pomiaru laserowego są generalnie niższe od uzyskanych z pomiarów terenowych. Teza ta wydaje się logiczna, jeśli wziąć pod uwagę, że impuls lasera może zostać odbity nie od wierzchołka drzewa, lecz od elementów korony położonych niżej.

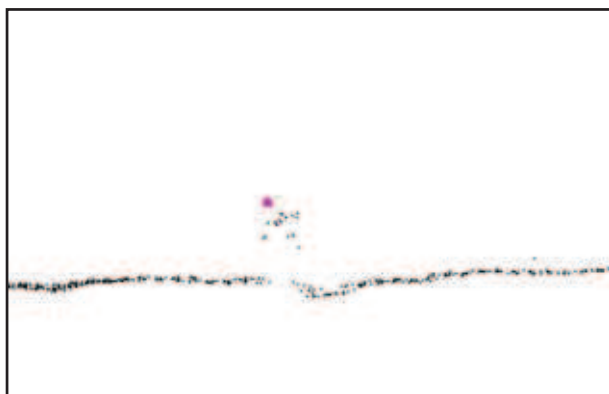
Dla przedstawionej próby testowej uzyskano ponadto następujące parametry statystyczne:

- maksymalna odchyłka ujemna: $-3,562$ m
- maksymalna odchyłka dodatnia: $2,615$ m
- odchylenie standardowe: $1,167$ m



Rys. 2. Histogram rozkładu odchylek

Przeprowadzono wizualną analizę profili pojedynczych drzew. Analizując profil dla drzew nr 17, 18 i 19 – maksymalna odchyłka -3.562 (rys.3) widać wyraźnie w surowych danych laserowych niewielką skarpę, przebiegającą w pobliżu drzewa. Stwierdzono, że to błędnie wygenerowany DTM dla tego fragmentu, miał wpływ na nieprawidłowe określenie wysokości drzew w tym rejonie.



Rys. 3. Błędne wyznaczenie wierzchołka drzewa nr 19 (odchyłka - 3,562 m).
Wierzchołek drzewa z pomiaru terenowego oznaczono kwadratem

4.2. Obszar testowy nr 2

Pole testowe nr 2 zlokalizowane jest w części wschodniej obszaru badawczego. Wysokość drzew określono analogicznie, jak na obszarze testowym nr 1 i porównano z wynikami pomiarów terenowych. Analiza pojedynczych profili ujawniła wystąpienie

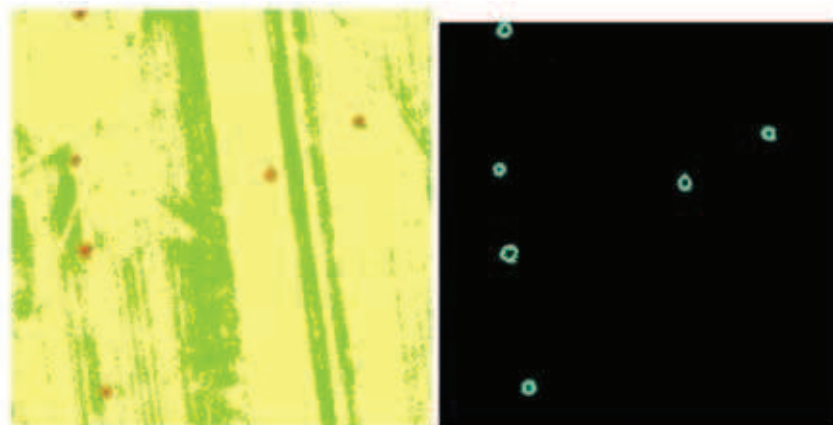
czynnika systematycznego Zauważono przesunięcie sytuacyjne i wysokościowe między danymi laserowymi, a danymi kontrolnymi.

Dla części obszaru pola testowego nr 2 brakowało danych z nalotu wiosennego, w związku z czym posilkowano się danymi uzyskanymi z nalotu letniego. Postanowiono sprawdzić, czy czynnik systematyczny nie jest związany z różnicą między nalotami. Wybrano fragment powierzchni, dla której posiadano dane z obydwu pór roku. Wygenerowano dwie powierzchnie TIN, a następnie wyznaczono różnicę wiosna-lato. Uzyskano wartość średnią $-0,235$ m, co świadczy o wystąpieniu czynnika systematycznego – dane z nalotu wiosennego są położone niżej niż dane z nalotu letniego. Fakt ten wydaje się logiczny, gdyż obserwowana różnica może wynikać z rozwoju roślinności w okresie letnim. Wówczas znaczna część impulsów lasera mogła odbić się powyżej rzeczywistej powierzchni topograficznej.

Najkorzystniejszym rozwiązaniem w przypadku określenia wysokości drzew okazało się wyznaczenie różnic pomiędzy [DSM-lato] i [DTM-wiosna]. Niestety uzyskane wyniki nadal nie były satysfakcjonujące. W związku z tym zdecydowano się na odmienne podejście do analizowanych danych. Postanowiono w pierwszym etapie wyznaczyć granice przestrzenne koron drzew z pomiaru laserowego. Wysokość pojedynczego drzewa została określona jako wartość maksymalna w granicach wyznaczonej korony. Wartość ta była traktowana jako wyznaczony wierzchołek drzewa i była porównywana z niezależnym pomiarem terenowym.

Do detekcji pojedynczych drzew wykorzystano wygenerowane modele DSM i DTM. W pierwszym kroku wygenerowano numeryczny model koron drzew (ang. *DCM*) poprzez odjęcie DTM od DSM. DCM został wygładzony z wykorzystaniem filtru Gaussa. Następnie uzyskany model poddano segmentacji wododziałowej (ang. *watershed segmentation*) (Beucher, 1991). Według badań (Kwak *et al.*, 2007), metodę tą cechują pewne ograniczenia. Liczba drzew może zostać zarówno zaniżona, jak i nadmiernie oszacowana, z powodu zmian wysokości w obrębie pojedynczych koron (niższe drzewa pod koronami wyższych).

W przeprowadzonych badaniach skupiono się wyłącznie na problemie dokładności określenia wysokości pojedynczych drzew na podstawie pomiaru laserowego. Dla tak postawionego zadania segmentacja wododziałowa okazała się wystarczająca (rys. 4).



Rys. 4. Drzewa kontrolne (po lewej) i wyznaczone zasięgi ich koron (po prawej)

Wysokość każdego drzewa określono jako wartość maksymalną w granicach wyznaczonej korony. Wyznaczone wysokości zostały porównane z danymi kontrolnymi, czyli zbiorem 44 drzew, pomierzonych niezależnie w terenie. Uzyskano następujące parametry statystyczne:

- maksymalna odchyłka ujemna: -1,493 m
- maksymalna odchyłka dodatnia: 1,585 m
- wartość średnia odchyłek: -0,273 m
- odchylenie standardowe: 0,745 m

Szczegółowa analiza poszczególnych profili drzew kontrolnych przyniosła zadawalające wyniki. Większość odchyłek nie przekraczała wartości 0,5 m. Tylko dla dwóch drzew uzyskano różnice powyżej 1 m (patrz: maksymalna odchyłka ujemna i dodatnia). Wartość średnia odchyłek świadczy o czynniku systematycznym, który ujawnił się podczas wszystkich przeprowadzonych analiz. Można w związku z tym postawić tezę, że określenie wysokości drzew z wykorzystaniem wyłącznie danych laserowych powoduje zaniżenie uzyskiwanych wyników.

5. PODSUMOWANIE

Dane laserowe, ze względu na możliwość pozyskiwania DTM dla terenów leśnych o dużej dokładności, pozwalają na opracowywanie nowych, alternatywnych metod określania podstawowych parametrów drzew.

W niniejszej pracy przebadano, czy numeryczny model koron drzew (DCM), pozyskany jako różnica pomiędzy DSM i DTM, pozwala na miarodajne określenie wysokości pojedynczych drzew.

Dla pola testowego o nieskomplikowanym ukształtowaniu terenu, wyznaczony model przyniósł zadawalające dokładności – wartość średnia odchyłek wyniosła -0,623 m.

Drugie pole testowe okazało się bardziej złożone zarówno pod względem rzeźby terenu jak i obiektów pokrycia. Prosta operacja wyznaczenia różnicy pomiędzy DSM i DTM wygenerowała odchyłki wielokrotnie przekraczające oczekiwane dokładności. W związku z tym dla wygenerowanego modelu DCM, zostały wyznaczone zasięgi przestrzenne pojedynczych koron, przy użyciu algorytmów przetwarzania obrazów. Model DCM wygładzono z wykorzystaniem filtru Gaussa, po czym zastosowano segmentację wododziałową. Wysokość każdego drzewa określono jako wartość maksymalną w granicach wyznaczonej korony. Uzyskano wartość średnią odchyłek równą -0,273 m.

Przeprowadzone prace badawcze ujawniły przydatność modelu DCM, pozyskanego wyłącznie z danych laserowych, do określania wysokości pojedynczych drzew. Stwierdzono, że wygenerowany model koron nie zawsze spełnia wymagane dokładności i konieczne są dodatkowe analizy.

Podczas wszystkich badań ujawnił się czynnik systematyczny. Można w związku z tym postawić tezę, że określenie wysokości drzew z wykorzystaniem wyłącznie danych laserowych powoduje zaniżenie uzyskiwanych wyników.

Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2005-2007 jako projekt badawczy 2 P06L 02229 "Zastosowanie lotniczego i naziemnego skaningu laserowego w analizie struktury przestrzennej i funkcjonowania lasów w krajobrazie".

6. LITERATURA

Axelsson P., 1999. Processing of laser scanner data – algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* (54), s. 138-147.

Axelsson P., 2000. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Amsterdam, Vol. XXXIII/4B, s. 110-117.

Beucher S., 1992. The watershed transformation applied to image segmentation. *Scanning Microscopy International*, suppl. 6, s. 299-314.

Będkowski K., Adamczyk J., Brach M., Gzowski P., Karaszewicz W., Krawczyk A., Marmol U., Mikrut S., Miścicki S., Morańda M., Olenderek H., Stereńczak K., Stępniewski P., Walo J., Zawadka R., 2008. Raport końcowy projektu badawczego 2 P06L 02229 *Zastosowanie lotniczego i naziemnego skaningu laserowego w analizie struktury przestrzennej i funkcjonowania lasów w krajobrazie*. Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, SGGW w Warszawie.

Kwak D-A., Lee W-K., Lee J-H., Biling G. S., Gong P., 2007. Detection of individual trees and estimation of tree height using LIDAR data. *Journal of Forest Research*, Vol. 12, s. 425-434.

Marmol U., 2002. Analiza częstotliwościowa jako metoda filtrowania profili powierzchni topograficznej. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 12b, s. 257-268.

Marmol U., 2003. Pozyskiwanie Numerycznego Modelu Powierzchni Topograficznej (NMPT) w oparciu o dane wysokościowe pochodzące z lotniczego skanera laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 13b, s. 419-426.

Marmol U., Jachimski J., 2004. A FFT based method of filtering airborne laser scanner data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Istanbul, Vol. XXXV/3, s. 1147 – 1152.

Piechocka N., Marmol U., Jachimski J., 2004. Stereometryczna weryfikacja DTM uzyskanego ze skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 14, s.

TerraScan, 1999. *TerraScan for Microstation. User's guide*. TerraSolid Ltd.

TopoSys, 2008. www.toposys.de.

ACCURACY OF TREE HEIGHT ESTIMATION USING LIDAR DATA-DERIVED DCM

KEY WORDS: DTM, DSM, DCM, airborne laser scanning, tree height, accuracy

Summary

The tree height of a forest stand is a crucial parameter determining a forest space. In this paper, results of a study aimed at extracting the height of individual trees using only LIDAR data are presented. The study focused on the Gluchow forest owned by the Warsaw University of Life Sciences (SGGW). Laser data were acquired twice – in spring and in summer. The laser-sampling density was approximately 6 points/m².

An unsophisticated algorithm for DSM generation, using the first laser impulse, was developed. DTM generation, i.e., extraction of points belonging to the topographic surface from point clouds formed an important part of the study. Two filtering methods: the FFT-based frequency analysis and the adaptive TIN model were used.

The accuracy analysis of DTM and DSM was performed at two test sites. The filtering algorithms were found to have some limitations. The largest errors were detected for areas with low, dense vegetation, which were completely classified to topographic surface. It was necessary to correct the results and eliminate the incorrectly classified points.

Heights of individual trees were determined using only laser data. At the first test site satisfying results were produced by using the simple method of subtracting DTM from DSM. The calculated tree heights were compared with check point data collected during a high-accuracy topographic survey. The mean deviation of -0.456 m was completely sufficient.

The other test site was more complex and required more advanced methods of analysis. At the first step, a digital crown model (DCM) was calculated by subtracting DTM from DSM. DCM was smoothed by a Gaussian filter. The following step involved segmentation of the watershed to estimate crown areas. The heights of individual trees was determined as the local maxima. These values were compared with the check point data, whereby a mean deviation equal to -0.273 m was obtained. To conclude, the results of this study demonstrated lidar data to have a high potential for use in tree height estimation.

dr inż. Urszula Marmol
e-mail: entice@agh.edu.pl
tel. 012 617 39 93

dr hab. inż. Krzysztof Będkowski
e-mail: Krzysztof.Bedkowski@wl.sggw.pl
tel. 022 593 82 22