

GENEROWANIE NMT I NMPT OBSZARÓW Z POKRYWA ROŚLINNĄ NA PODSTAWIE DANYCH LIDAROWYCH

GENERATING DIGITAL TERRAIN MODELS AND DIGITAL SURFACE MODELS OF PLANT COVER AREAS ON THE BASIS OF LIDAR DATA

Sławomir Mikrut¹, Urszula Marmol¹, Krzysztof Będkowski²

¹Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej,
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

²Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa,
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

SŁOWA KLUCZOWE: skanowanie laserowe, lidar, NMT, NMPT, interpolacja NMT

STRESZCZENIE: Jednym z ważniejszych tematów badawczych ostatnich lat jest możliwość zastosowania technologii skaningu laserowego do pozyskiwania danych przestrzennych. Altimetria laserowa jest szeroko stosowaną na świecie metodą pozyskiwania informacji o powierzchni topograficznej, a także innych elementach pokrycia terenu. Wynika to z niewątpliwych zalet tej techniki; wśród najważniejszych warto wymienić wysoką dokładność wysokościową danych, niezależność od warunków oświetleniowych i częściowo pogodowych, wysoką gęstość danych źródłowych. Charakterystycznym parametrem wiązki lasera jest zdolność przenikania impulsu przez pokrywę roślinną. Interesującą kwestią jest ponadto możliwość rejestracji kilku odbić związanych z pojedynczym impulsem. Cechy te sprawiają, że technologia ta znajduje szerokie zastosowanie dla terenów porośniętych roślinnością. Dane laserowe pozwalają na generowanie Numerycznego Modelu Terenu obszarów leśnych (np. projektowanie dróg, systemów odwadniających itp.). Umożliwiają także określenie podstawowych parametrów roślinności takich jak: wysokość drzew, średnica korony, gęstość zalesienia, oszacowania biomasy, określenia granic lasu. Niniejszy artykuł przedstawia możliwości wykorzystania lotniczego skaningu laserowego w procesie generowania Numerycznego Modelu Terenu i Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu dla obszarów z pokrywą roślinną. Zaprezentowano metody filtrowania danych oraz dokonano przeglądu metod interpolacji Numerycznego Modelu Terenu z danych laserowych. Podsumowanie i wnioski zaprezentowano w ostatnim rozdziale. Praca została sfinansowana 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”.

1. WSTĘP

Dzięki wieloletniej współpracy pomiędzy AGH i SGGW, udało się pozyskać projekt, pozwalający na opracowanie i wdrożenie nowej technologii – skaningu laserowego. Jest to

bowiem jeden z ważniejszych obecnie tematów badawczych ostatnich lat w wielu instytucjach.

Skaning laserowy jest coraz szerzej stosowany na świecie jako metoda pozyskiwania informacji o powierzchni topograficznej, a także innych elementach pokrycia terenu. Wynika to z niewątpliwych zalet tej techniki; wśród najważniejszych warto wymienić wysoką dokładność wysokościową danych, niezależność od warunków oświetleniowych i częściowo pogodowych, wysoką gęstość danych źródłowych. Charakterystycznym parametrem wiązki lasera jest zdolność przenikania impulsu przez pokrywę roślinną. Interesującą kwestią jest ponadto możliwość rejestracji kilku odbić związanych z pojedynczym impulsem. Cechy te sprawiają, że technologia ta znajduje szerokie zastosowanie dla terenów porośniętych roślinnością. Dane laserowe pozwalają na generowanie Numerycznego Modelu Terenu obszarów leśnych (np. projektowanie dróg, systemów odwadniających itp.). Umożliwiają także określenie podstawowych parametrów roślinności takich jak: wysokość drzew, średnica korony, gęstość zalesienia, oszacowania biomasy, określenia granic lasu. Niniejszy artykuł przedstawia możliwości wykorzystania lotniczego skaningu laserowego w procesie generowania Numerycznego Modelu Terenu i Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu dla obszarów z pokrywą roślinną. W niniejszej publikacji zaprezentowano metody filtrowania danych oraz dokonano przeglądu metod interpolacji Numerycznego Modelu Terenu z danych laserowych. Podsumowanie i wnioski zaprezentowano w ostatnim rozdziale.

2. ISTOTA TECHNIKI LASEROWEJ

Technika skaningu laserowego zwana też lidarową od słowa LIDAR (ang.: *Light Detection and Ranging*) w swojej istocie działania jest analogiczna do metody radarowej, tzn. jest to również system aktywny tylko operujący w innym zakresie fal (radar w zakresie mikrofalowym, lidar - optycznym). W skład systemu wchodzi emiter, czyli urządzenie produkujące wiązkę laserową (którego cechą jest emisja spójnej wiązki światła) oraz odbiornik, czyli urządzenie zbierające powracającą po odbiciu wiązkę danych. W przypadku terenów odkrytych wiązka padająca, po odbiciu od powierzchni powraca do urządzenia emitującego i jest rejestrowana. Można wówczas w sposób prosty zbudować Numeryczny Model Terenu. Sytuacja się komplikuje, gdy mamy teren pokryty roślinnością (lasy, krzewy etc.). Wówczas fala powracająca jest rozpraszana i rejestrujemy promienie, będące odbiciem zarówno od powierzchni terenu jak i koron drzew. Dostajemy chmurę punktów, którą w zależności od potrzeb należy odpowiednio przefiltrować.

Zasada działania skaningu laserowego oparta jest na wyznaczeniu odległości od sensora do badanej powierzchni poprzez pomiar czasu pomiędzy wysłaniem a odbiorem pojedynczego impulsu laserowego. Skaner laserowy może być zainstalowany na pokładzie samolotu lub śmigłowca. Pozycjonowanie „statku powietrznego” odbywa się dzięki systemowi nawigacyjnemu GPS (ang. *Global Positioning System*) oraz inercyjnemu INS (ang. *Inertial Navigation System*). Rejestrowana jest też również intensywność odbicia impulsu. Przykładowe parametry skaningu laserowego :

- długość fali skanera (ozn. λ) : 1.047 - 1.064 μm ;
- częstotliwość impulsu (F) : 5-80 kHz;

- kąt skanowania : (10 – 20 max) ;
- wysokość lotu (h) : 20-6000 m;
- średnica plamki lasera (A): 0,25-2 m.
- ilość rejestrowanych odbić impulsu: 2-9;
- dokładność wysokościowa 15-25 cm;
- dokładność sytuacyjna 10-100 cm.

W artykule podjęto próbę usystematyzowania metod pozwalających na generowanie NMT (Numerycznego Modelu terenu) oraz NMPT (Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu).

3. POZYSKIWANIE NMT Z WYKORZYSTANIEM DANYCH LIDAROWYCH

3.1. Technologia laserowa a możliwość pozyskiwania NMT i NMPT

Impuls laserowy posiada zdolność przenikania przez pokrywę roślinną, co pozwala na pozyskiwanie NMT dla obszarów zalesionych. Współczynnik przenikania, czyli stosunek liczby punktów odbitych od powierzchni terenu, do liczby wszystkich punktów pomierzonych w terenie zalesionym, zmienia się w zależności od pory roku. W lecie, z powodu gęstego listowia, współczynnik przenikania wynosi około 25% dla lasu liściastego i 30 % dla lasu iglastego. W okresie zimowym współczynnik penetracji wzrasta do 70%.

Jest to zdecydowana przewaga metody lidarowej w porównaniu do tradycyjnych metod fotogrametrycznych, dla których opracowanie NMT dla terenów leśnych jest wysoce skomplikowane.

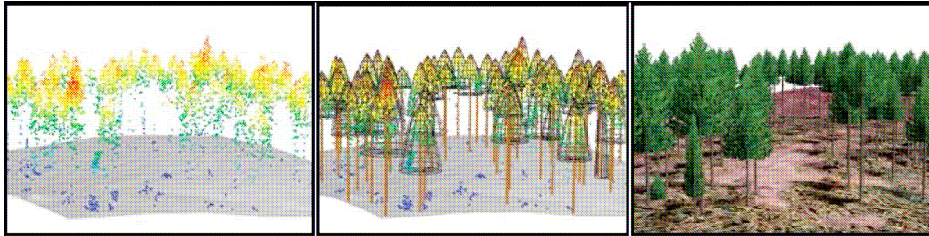
3.2. Możliwość rejestracji kilku odbić pojedynczego impulsu oraz intensywności odbicia impulsu

Systemy skanerowe umożliwiają rejestrację dodatkowych informacji związanych z pomiarem laserowym, które mogą być pomocne w procesie przetwarzania danych laserowych.

Pierwszym istotnym parametrem jest możliwość rejestracji kilku odbić pojedynczego impulsu lasera. W obecnych systemach istnieje możliwość rejestracji nawet 7-9 odbić związanych z pojedynczym impulsem.

Rejestracja ostatniego odbicia w przypadku terenów leśnych pozwala na generowanie NMT dla tych obszarów.

Rejestracja pierwszego i ostatniego odbicia pozwala określić wysokość drzew, odbicia pośrednie mogą znaleźć zastosowanie przy wyznaczaniu średnicy korony i szerokości pierścienicy.



Rysunek 1 Lewy: dane o roślinności wydobyte z chmury punktów laserowych. Środkowy: wizualizacja oszacowanych koron i pni drzew. Prawy: rendering lasu – (źródło (Rapp, 2005)).

Dane laserowe pozwalają także na określenie parametrów drzewostanu takich jak: wysokość drzewostanu (średnia wysokość wszystkich dominujących i współdominujących drzew w drzewostanie), objętość drzewostanu (całkowita objętość w pniu, nie zawierająca rozgałęzień), gęstość zalesienia, oszacowanie biomasy czy określenie granic lasu.

Wraz z rejestracją położenia w przestrzeni danego punktu, zapisywana jest natężenie promieniowania odbitego (intensywność odbicia impulsu) od danej powierzchni. Skaner laserowy jest systemem aktywnym – emituje własne promieniowanie elektromagnetyczne. Zakładając homogeniczność powierzchni odbijającej, natężenie promieniowania odbitego I jest proporcjonalne do mocy impulsu P i współczynnika odbicia powierzchni oświetlonej przez impuls – r , a odwrotnie proporcjonalny do kwadratu odległości między sensorem a powierzchnią topograficzną h (Katzenbeisser, 2002):

$$I \approx \frac{P \cdot r}{h^2} \quad (1)$$

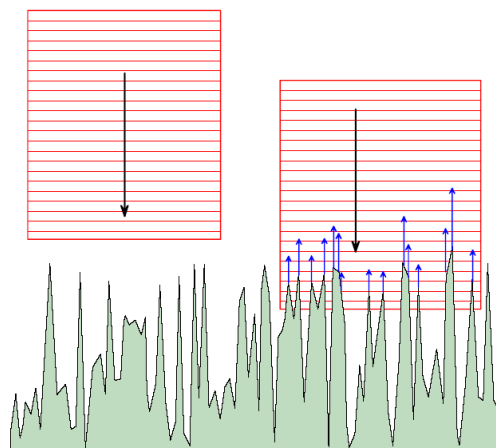
Współczynnik odbicia jest uwarunkowany rodzajem powierzchni. W poniższej tabeli zostały przedstawione współczynniki dla charakterystycznych form pokrycia terenu.

Tabela 2.1 Współczynnik odbicia dla różnych powierzchni (Riegl, 2005)

Rodzaj powierzchni	Współczynnik odbicia (%)
Śnieg	80-90
Las liściasty	~ 60
Piasek	~ 50-40
Las igłasty	~ 30
Budynki (dachy o różnym pokryciu)	~ 20-30

Czy te dodatkowe parametry mogą okazać się pomocne w procesie przetwarzania danych laserowych dla terenów leśnych?

Analizy przeprowadzone przez (Katzenbeisser, 2003) to szczegółowy opis sposobu rejestracji poszczególnych impulsów lasera dla obszarów z pokrywą roślinną. Rysunek 2 przedstawia schemat przebiegu impulsu lasera dla hipotetycznej powierzchni leśnej.



Rys 2. Schemat przebiegu pojedynczego impulsu lasera dla terenów zalesionych (źródło (Katzenbeisser, 2003))

Pierwsze odbicie pojedynczego impulsu lasera będzie związane z najwyższymi koronami drzew. Wraz z biegiem impulsu lasera w głąb wegetacji zostaną zarejestrowane kolejne odbicia od konkretnych gałęzi.

Widać wyraźnie, że intensywność odbicia będzie stanowić sumę osłabionych odbić częściowych od kolejnych poziomów roślinności.

Warto również zwrócić uwagę na fakt, że niektóre powierzchnie odbijające mogą być częściowo zasłonięte przez obiekty znajdujące się powyżej. Rejestracja większej ilości odbić w terenie zalesionym jest zatem z oczywistych względów ograniczona.

Z analiz przeprowadzonych przez Katzenbeissera wynika, że wykorzystanie danych związanych z rejestracją intensywności odbicia jest zagadnieniem wysoce skomplikowanym. Jedynie dla powierzchni płaskich intensywność odbicia daje miarodajną informację o rejestrowanym obiekcie. Dla terenów zalesionych, gdzie mamy do czynienia z częściowym odbiciem impulsu od kolejnych poziomów roślinności, analiza intensywności wymaga rozważenia szeregu dodatkowych parametrów.

Prace badawcze nad wydzieleniem poszczególnych klas użytkowania terenu, w tym roślinności, przy wykorzystaniu informacji o intensywności, były także prowadzone przez (Song, Han, Kim, 2002). Wyniki uzyskane dla roślinności nie były satysfakcjonujące; głównie ze względu na fakt, że wartość intensywności dla traw i drzew jest zbliżona i wynosi około 50%. We wnioskach końcowych stwierdzono, że jeśli w klasyfikacji oprócz danych intensywności wykorzystane zostaną dane wysokościowe z pomiaru laserowego to rozdzielenie klasy 'trawy' od kategorii 'drzewa' będzie możliwe.

Interesujące badania przeprowadzili (Charaniya, Manduchi, Lodha, 2004). W swoich rozważaniach wykorzystali oni istotne cechy związane z pomiarem laserowym takie jak: znormalizowana wysokość – czyli różnica pomiędzy NMT i NMPT, tekstura – wyznaczana na podstawie lokalnej zmiany wysokości, różnica wysokości pomiędzy pierwszym a ostatnim impulsem oraz intensywność.

Wykorzystanie tych informacji prowadziło do prawidłowego wydzielenia drzew z danych laserowych. Autorzy zauważyli jednakże, że włączenie zdjęć lotniczych, do przedstawionego powyżej zbioru danych, wpłynęło na poprawę przeprowadzonej klasyfikacji. Reasumując, najistotniejsze spostrzeżenia to:

- znormalizowana wysokość jako cecha jest ważnym klasyfikatorem odróżniającym obiekty pokrycia terenu od samej powierzchni terenu;
- tekstura pełni ważną rolę w klasyfikacji obszarów porośniętych wysoką roślinnością;
- luminacja z obrazowań lotniczych i intensywność z pomiaru laserowego są użyteczne w rozdzieleniu niskiej roślinności (tj. traw).

4. SPOSOBY FILTRACJI DANYCH LASEROWYCH

Pomiar laserowy dostarcza informacji, w postaci trójwymiarowej chmury punktów nieregularnie rozmieszczonych, o powierzchni topograficznej jak również o innych obiektach pokrycia terenu (budynki, roślinność). Filtracja, czyli wyodrębnienie punktów położonych na powierzchni topograficznej, z chmury punktów pomierzonych, stanowi jeden z głównych problemów przetwarzania danych laserowych. W ostatnich latach wiele badań zostało przeprowadzonych w celu opracowania i rozwoju nowych algorytmów filtracji powierzchni topograficznej. Niniejszy rozdział stanowi krótkie omówienie kilku najważniejszych algorytmów.

Generalnie, metody, ze względu na zasadę działania można podzielić na algorytmy stosujące strukturę hierarchiczną lub algorytmy iteracyjne. Wspólną cechą prawie wszystkich metod jest akcent na punkty o najniższych wysokościach, jako prawdopodobne punkty terenowe.

Bardzo często dane laserowe są dostarczane w postaci wstępnie uporządkowanej, czyli zapisane w siatce regularnej. W tym celu przeprowadza się interpolację punktów siatki regularnej w oparciu o punkty rozproszone pochodzące z pomiaru laserowego. Operacja ta jest często stosowana w metodach filtracji ze względu na możliwość stosowania uproszczonych algorytmów. Dodatkową korzyścią jest znacząca redukcja danych, gdyż zapisywane są wyłącznie wysokości punktów, zakres obszaru badań i odstęp między punktami. Z drugiej strony dane laserowe zawierają zarówno punkty terenowe, jak i punkty zlokalizowane na innych obiektach pokrycia terenu. Zastosowanie interpolacji może przyczynić się do zafałszowania przebiegu powierzchni i utrudnienia procesu filtracji.

Do filtracji danych laserowych bardzo często wykorzystywane są metody analizy i przetwarzania obrazów cyfrowych. Dane laserowe zapisane w rastrze mogą być traktowane

jako obraz cyfrowy, w którym wartości jasności pikseli odpowiadają wysokościami punktów pomiarowych.

Jedną z metod filtracji obrazów cyfrowych są tzw. filtry morfologiczne. Morfologia matematyczna jest narzędziem ekstrakcji cech z obrazu cyfrowego, wykorzystywanym w analizie kształtu elementów na obrazie, ich wzajemnego położenia, a także w procesach wstępnego i finalnego przetwarzania (Stenberg, 1986). Dwie główne operacje morfologiczne to erozja – filtr minimalny i dylatacja – filtr maksymalny, czyli wybór odpowiednio minimalnego i maksymalnego punktu z okna o określonym rozmiarze.

Erozja i dylatacja wygładzają brzegi elementów na obrazie, mają jednak istotną wadę, gdyż ingerują w pole powierzchni elementu: erozja zmniejsza je, natomiast dylatacja powiększa (Wojnar, Majorek, 1994). Aby wyeliminować tę wadę wprowadzono dwa przekształcenia będące scaleniem poprzednich: operator otwarcia i zamknięcia. Operator otwarcia w pierwszej kolejności wykonuje erozję a następnie dylatację, operator zamknięcia odwrotnie.

Algorytmy oparte na zmodyfikowanych wersjach operatora otwarcia zaproponowali (Kilian *et al*, 1996), (Zhang *et al*, 2002). Jednakże, jeśli punkty pomiarowe zawierają błędy grube, użycie operatora otwarcia, czyli innymi słowy filtrów o ekstremalnych wartościach jest niestabilne, ponieważ rezultat może być pod znaczącym wpływem pojedynczego błędu grubego. Filtr redukujący te ograniczenia to tzw. filtr podwójnego rzędu (ang. *dual rank*) (Eckstein, Steger, 1996).

Zapis w regularnej siatce wpływa zasadniczo na szybkość algorytmu, jednak proces interpolacji wprowadza dodatkowe błędy, co w znacznym stopniu komplikuje filtrowanie danych. Dlatego też, niektórzy badacze postanowili operować na oryginalnym zbiorze danych wprowadzając modyfikację filtrów morfologicznych. Należą do nich: algorytm progowania nachyleń w TIN (Vosselman, Maas, 2001) lub algorytm zaproponowany przez (Roggero, 2002).

Kolejnym przykładem wykorzystania algorytmów analizy obrazów cyfrowych jest tzw. metoda gradientowa opracowana przez (Hyppä *et al*, 2002). W metodzie tej wykorzystywana jest informacja o gradiencie, który jest aproksymowany poprzez różnicę wartości wysokości sąsiednich punktów. Inna metoda wykorzystująca gradient została opracowana w Instytucie Cyfrowego Przetwarzania Obrazów w Graz (Wack R., Wimmer A., 2002).

Interesującą metodą filtracji wykorzystującą algorytmy przetwarzania obrazów jest algorytm modelowania aktywnej powierzchni. Metoda oparta jest na technice dopasowywania modelu do danych zapisanych w postaci obrazu cyfrowego poprzez minimalizację funkcji energii. Model aktywnej powierzchni jest rozszerzeniem do przestrzeni trójwymiarowej modelu aktywnego konturu (ang. *snake*) (Kass *et al*, 1987).

Metodą filtracji, o której warto wspomnieć jest predykcja liniowa, która została zaimplementowana w programie SCOP++. Oparta jest ona na iteracyjnym aproksymowaniu powierzchni z uwzględnieniem funkcji wagowej. Poszczególne punkty pomiarowe są wagowane w zależności od wartości odchyłki danego punktu pomiarowego od powierzchni aproksymowanej w poprzedniej iteracji. Jako metodę aproksymacji powierzchni wykorzystano liniową predykcję, zbliżoną w swych założeniach do

„krigingu”. Prace badawcze dla terenów zurbanizowanych o dużym zagęszczeniu doprowadziły do rozszerzenia opisanego algorytmu (Pfeifer *et al.*, 2001), czyli hierarchicznego zastosowania liniowej predykcji. Nowe podejście jest porównywalne z uporządkowaną strukturą piramidy obrazów, tzn. początkowo opracowuje się dane o sztucznie zmniejszonej rozdzielczości, a w kolejnych krokach dochodzi do sukcesywnego zwiększania rozdzielczości.

Kolejna metoda, czyli algorytm aktywnego modelu TIN, został rozwinięty na Wydziale Geodezji i Fotogrametrii w Królewskim Instytucie Technicznym w Sztokholmie (Axelsson, 2000). Na opracowanym algorytmie bazuje komercyjne oprogramowanie, TerraScan. Początkowa reprezentacja terenu to TIN, generowany na wyselekcjonowanych punktach najniższych. Ostateczna powierzchnia jest tworzona przez iteracyjne dodawanie kolejnych punktów do TIN-a. Punkty te są wybierane ze zbioru punktów pomiarowych i na podstawie określonych kryteriów są akceptowane lub odrzucane jako nowe punkty terenowe.

Inna metoda w celu filtracji danych laserowych stosuje aproksymację z wykorzystaniem krzywych sklepanych (Brovelli *et al.*, 2002). Algorytm ten został zaimplementowany w oprogramowaniu systemu GRASS.

Algorytm zaproponowany przez (Sohn, 2002) to model TIN z kryterium MDL. Algorytm ten opiera się na stopniowym zagęszczaniu TIN w dwóch etapach: zagęszczanie „ku dołowi” (ang. *downward divide-and-conquer triangulation process*) i zagęszczanie „w górę” (ang. *upward divide-and-conquer triangulation process*). Na początkowej reprezentacji powierzchni topograficznej – TIN, generowane są czworokąty łączące punkt, będący kandydatem na punkt terenowy z trójkątem położonym poniżej. Kryterium MDL jest zastosowane w celu określenia optymalnego modelu czworokątna. MDL koduje prawdopodobieństwo warunkowe kątów pomiędzy ścianami czworokątna a trójkątem TIN. Punkt, którego kod prawdopodobieństwa warunkowego jest najmniejszy jest klasyfikowany jako punkt terenowy.

Przedstawione w niniejszym rozdziale metody są w dalszym ciągu modyfikowane i udoskonalane, w celu dostosowania ich do różnych, często specyficznych form terenu.

W 2003 roku w ramach Grupy Roboczej III/3 „3D reconstruction from airborne laser scanner and InSAR data” Komisji III ISPRS przeprowadzono badania związane z porównaniem istniejących metod automatycznej filtracji danych laserowych (Sithole, Vosselman, 2003). Głównym celem prac badawczych było określenie sposobu funkcjonowania opracowanych algorytmów w określonych warunkach ukształtowania i pokrycia terenu. Przebadano także zachowanie algorytmów filtracji przy różnej gęstości danych testowych.

Badania te ujawniły zalety i wady poszczególnych metod filtracji danych laserowych. Generalnie, dla typowego, nieskomplikowanego obszaru (łagodnie nachylony teren, budynki średniej wielkości, rzadka roślinność, wysoki procent punktów terenowych) wszystkie badane algorytmy filtracji działały prawidłowo. Niestety filtracja skomplikowanych obszarów zurbanizowanych lub terenów o zwartej roślinności jest nadal zagadnieniem problematycznym i stanowi duże wyzwanie. W celu poprawy wyników,

autorzy opracowania sugerują wykorzystanie w procesie klasyfikacji dodatkowych danych zewnętrznych takich jak zdjęcia lotnicze lub informacje związane z intensywnością odbicia.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Badania prowadzone od wielu lat w różnych ośrodkach naukowych doprowadziły do rozwinięcia wielu metod filtracji danych i generowania NMT i NMPT z pomiarów laserowych.

Podsumowując można stwierdzić, że efektywność zaprojektowanych algorytmów może zależeć przede wszystkim od stopnia skomplikowania (złożoności) badanej powierzchni i maleje dla obszarów dla skomplikowanej złożoności. Nie opracowano do tej pory algorytmów potrafiących w 100 % przefiltrować dane i automatycznie usunąć błędy. Być może użycie dodatkowych informacji (danych zewnętrznych, takich jak obrazy cyfrowe czy innych danych GIS).

6. LITERATURA

Akel N. A., Zilberstein O., Doytsher Y., A robust method used with orthogonal polynomials and road network for automatic terrain surface extraction from lidar data in urban areas. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Vol. XXXV/3B, 243 – 248, Stambuł 2004

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

Brovelli M. A., Cannata M., Longoni U. M., Managing and processing LIDAR data within GRASS. *Proceedings of the Open source GIS – GRASS user conference*, Trento 2002.

Charaniya A.P., Manduchi R., Lodha S.K., Supervised parametric classification of aerial lidar data. Conference: *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2004.

Eckstein W., Steger C., Fusion of Digital Terrain Model and texture for object extraction. *Proceeding of 2nd Airborne Remote Sensing Conference*, 1-10, San Francisco 1996.

Elberink S. Q., Maas H-G., The use of anisotropic height texture measures for the segmentation of airborne laser scanner data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. XXXIII/3B, 678-684, Amsterdam 2000.

Hyypä J., Pyssalo U., Hyypä H., Samberg A., Elevation accuracy of laser scanning – derived digital terrain and target models in forest environment. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV / 3A, Graz 2002 .

Kass M., Witkin A., Terzopoulos D., Snakes: active contour models. *International Journal of Computer Vision*, 1,321-331, 1988.

Katzenbeisser R., TopoSys GmbH Technical note, <http://www.toposys.de/pdf-ext/Engl/TN-Intensity.pdf> Germany 2002.

Katzenbeisser R., TopoSys GmbH Technical note, http://www.toposys.de/pdf-ext/Engl/echo_detect3.pdf Germany 2003.

Kilian J., Haala N., Englich M., Capture and evaluation of airborne laser scanner data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXI / B3, 383-388, Wiedeń 1996.

Pfeifer N., Stadler P., Briese Ch., Derivation of digital terrain models in SCOP++ environment. *OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Digital Elevation Models*, Sztokholm 2001.

Riegl, URL: <http://www.riegl.com>, 2005

Roggero M., Object segmentation with region growing and principal component analysis. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV / 3A, 289-294, Graz 2002.

Song J.H., Han S.H., Kim Y.I., Assessing the possibility of land-cover classification using lidar intensity data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV/3B, 259-262, Graz, 2002.

Sithole G., Vosselman G., Report: ISPRS comparison of filters. ISPRS Commission III, Working Group 3, <http://www.geo.tudelft.nl/frs/isprs/filtertest>, 2003a.

Sohn G., Dowman I., Terrain surface reconstruction by the use of tetrahedron model with the MDL criterion. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV / 3A, 336-344, Graz 2002.

Song J-H., Han S-H., Yu K., Kim Y-I, Assessing the possibility of land-cover classification using lidar intensity data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV / 3B, 259-262, Graz 2002.

Stenberg S., Grayscale morphology. *Computer Vision, Graphics and Image Processing* vol.35, 333-355, 1986.

Tóvári D., Vögtle T., Classification methods for 3D objects in laserscanning data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Vol. XXXV/3B, 408 – 413, Stambul 2004.

Vosselman G., Maas H-G., Adjustment and filtering of raw laser altimetry data. *OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models*, Sztokholm 2001.

Wack R., Wimmer A., Digital terrain models from airborne laser scanner data – a grid based approach. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV / 3B, 293-296, Graz 2002.

Wojnar L., Majorek M., Komputerowa analiza obrazu. Fotobit Design, Kraków, 1994

Zhang K., Chen S., Whitmann D., Shyu M., Yan J., Zhang C., A progressive morphological filter for removing non-ground measurements from airborne LIDAR data. *Journal of Latex Class Files*. Vol.1(8), 2002.

GENERATING DIGITAL TERRAIN MODELS AND DIGITAL SURFACE MODELS OF PLANT COVER AREAS ON THE BASIS OF LIDAR DATA

KEY WORDS: laser scanning, lidar, DTM, DSM, interpolation of DTM

Summary

The possibility of using laser scanning technology to receive spatial data has been one of the more important research subjects of the recent years. The laser altimetry is the method of getting information about topographical surface, and also about different elements of land cover that is widely applied all over the world. This results from the unquestionable advantages of that technique; the most important of them to be mentioned include high exactness of altitude data, independence

from lighting conditions and partly from weather conditions, as well as high density of source data. The ability of the impulse penetration through plant cover is the characteristic parameter of the laser beam. Moreover, an interesting matter is also the possibility of registration of several reflections connected with a single impulse. Those features cause that the technology is widely used for lands overgrown with plants. Laser data permit to generate the Digital Terrain Model of forest areas (e.g. when designing roads, drainage systems, etc.). They make it possible to establish basic vegetation parameters, such as the trees' height, diameters of their crowns, density of afforestation, estimation of biomass, determination of forest borders. This paper presents the possibility of the application of the air laser scanning in the process of generating the Digital Terrain Model and Digital Surface Model for plant cover areas. It demonstrates methods of data filtering and reviews methods of Digital Terrain Model interpolation from laser data. Summary and conclusions were presented in the last chapter.

This project was financed from financial resources allocated towards research in 2005-2007, as the research project No. 2 P06L 02229 "The Use of Air and Ground Laser Scanning in the Analysis of Spatial Structure and Functioning of Forests in the Landscape".

Dane autorów:

Dr inż. Sławomir Mikrut
e-mail: smikrut@agh.edu.pl
telefon: (012) 617 23 02
fax: (012) 633 17 91

Dr inż. Urszula Marmol
e-mail: entice@agh.edu.pl
telefon: (012) 617 38 26
fax: (012) 633 17 91

Dr inż. Krzysztof Będkowski
e-mail: Krzysztof.Bedkowski@wl.sggw.pl
telefon: (022) 593 82 22
fax: