

**GENEROWANIE NUMERYCZNYCH MODELI POWIERZCHNI
ORAZ TERENU W TATRACH NA PODSTAWIE CHMURY PUNKTÓW
Z LOTNICZEGO SKANINGU LASEROWEGO (ALS)**

**GENERATION OF DIGITAL SURFACE AND TERRAIN MODELS OF THE
TATRAS MOUNTAINS BASED ON AIRBORNE LASER SCANNING (ALS)
POINT CLOUD**

Piotr Wężyk¹, Natalia Borowiec², Stanisław Szombara³, Robert Wańczyk³

¹Laboratorium GIS i Teledetekcji, Wydział Leśny Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

²KGFITŚ, Wydział Geodezji Górniczej Inżynierii Środowiska, AGH, Kraków

³ProGea Consulting, Kraków

SŁOWA KLUCZOWE: ALS, NMPT, NMT, znormalizowany NMPT, Tatry

STRESZCZENIE: Celem pracy było zaprezentowanie metod zastosowanych w pół-automatycznym procesie generowania numerycznych modeli bazujących na chmurze punktów zarejestrowanych technologią lotniczego skaningu laserowego (ang. *Airborne Laser Scanning*; ALS) w trudnych obszarach wysokogórskich Tatr. Teren badań o powierzchni około 60 km², obejmował masyw Kasprowego Wierchu, Kuźnice oraz fragment miasta Zakopane ze stokami Gubałówki. Dane ALS pozyskano w 2007 roku w 33 pasach (RIEGL LMS-Q560), w zagęszczeniu, co najmniej 20 pkt/m². Wpasowania połączonych skanów dokonano w oparciu o pomiary tachimetryczne powierzchni planarnych (dachy budynków) i dowiązanie przez dGPS. Błędy położenia punktów w płaszczyźnie poziomej wahały się w przedziale -0.09÷+0.28 m, a błędy wysokościowe w przedziale od -0.12÷0.14 m (HAE). Wykonawca dostarczył dane osobno z 2 skanerów, dla każdego: pierwsze i ostatnie odbicie impulsu. Ze względu na duży rozmiar plików podzielono je na mniejsze generując 353 obszary robocze o rozmiarze 500·500 m dla każdego skanera i numeru odbicia. Przeprowadzono filtrację chmury punktów oraz ich klasyfikację do zestawów danych: „low points”, „ground”, „low vegetation”, „medium vegetation”, „high vegetation” oraz „air points”. W celu wygenerowania NMPT stworzono klasę „ground inverse” wymagającą kontroli operatora wspomagającego się ortofotomozaiką cyfrową (RGB\CIR; kamera Vexcel). Dla każdego przetwarzanego obszaru roboczego wygenerowano NMT oraz NMPT. Na podstawie zweryfikowanych modeli wygenerowano znormalizowany numeryczny model powierzchni terenu obrazujący wysokości względne obiektów występujących w obszarze opracowania (drzewa, piętro kosodrzewiny, budynki, linie energetyczne, liny wyciągów, etc). Analizy przestrzenne bazujące na wygenerowanych modelach otwierają zupełnie nowe możliwości licznym badaniom naukowym.

1. WSTĘP

Postępujący rozwój technologii geoinformatycznych jak również świadomości ekologicznej szerokich grup społecznych w Polsce przynoszą ze sobą wzrost zapotrzebowania na aktualne i precyzyjne dane opisujące m.in. ukształtowanie terenu (NMT) oraz na informację o obiektach typu 3D tworzących elementy krajobrazu (np. las

czy infrastruktura techniczna). W związku z powyższym niezbędna staje się sprawna weryfikacja i aktualizacja geodanych dotyczących opracowań rzeźby terenu. Coraz częściej gwałtownie postępujący rozwój infrastruktury drogowej czy technicznej zaczyna kolidować z obszarami prawnie chronionymi (np. ESE Natura 2000). W sytuacjach konfliktowych dotyczących interesów poszczególnych grup społecznych najlepiej szukać rozwiązań poprzez debatę publiczną i rozważanie scenariuszy wyboru najbardziej odpowiednich wariantów inwestycji. Wykorzystanie w takich sytuacjach systemów wspomaganie decyzji (ang. *Decision Support Systems; DSS*) wywodzących się z Systemów Informacji Geograficznej (GIS), wymusza odpowiednią jakość stosowanych danych, w tym informacji o rzeźbie terenu i klasach jego pokrycia. Tego typu dane gromadzone są w PZGiK od bardzo wielu lat i pochodzą głównie z opracowań fotogrametrycznych (np. Phare 2001), pomiarów bezpośrednich (geodezyjnych) czy też z wektoryzacji map warstwicznych (topograficznych; DTED-2). Problem dla fotogrametrycznych opracowań rzeźby terenu stanowią obszary leśne (ok. 28% powierzchni kraju), które ze względu na zwarcie koron drzew uniemożliwiają poprawne posadowienie znacznika pomiarowego. Numeryczny Model Powierzchni Terenu, może być obecnie tworzony na drodze manualnych lub automatycznych obserwacji znanych jako *stereomatching*. Nowe kamery cyfrowe, szybkie stacje fotogrametryczne i zaawansowane algorytmy bazujące na autokorelacji obrazu rastrowego dają duże możliwości w tworzeniu NMPT dla obszarów leśnych tą technologią (Bałsavius 1999a, Bałsavius 1999b, St-Onge et al. 2006). Wykorzystanie danych pochodzących z lotniczego skaningu laserowego (ALS) do generowania modeli NMT i NMPT i tworzenia produktów pochodnych (znormalizowanych NMPT) jest znane blisko już od 10 lat (Wehr i Lohr 1999, Wężyk et al. 2006). Niezmierna precyzja pomiaru ALS sięgająca 10÷15 cm (współrzędna Z) i 30÷50 cm (współrzędne XY) wraz z pojawieniem się skanerów nowych generacji (większa częstotliwość wysyłania impulsu do 200 kHz i możliwość rejestracji więcej niż pierwszego i ostatniego odbicia – szczególnie urządzenia typu full waveform) otwiera nowe możliwości generowania poprawnych modeli terenu w obszarach leśnych w tym szczególnie w górach (Næsset 1997, Hyypä et al. 2000; Ducic 2006, Wężyk et al. 2008). Komercyjne oprogramowania (np. Terrasolid) umożliwiają przetwarzanie danych ALS, które polega na eliminacji (filtracji) punktów, odbitych od obiektów tworzących pokrycie terenu (np. od koron drzew czy linii energetycznych), w celu generowania NMT (Lee et al. 2002, Marmol 2003). Służy to aproksymacji przebiegu gruntu przy wykorzystaniu różnego rodzaju algorytmów, tj.: gradientowych (Hyypä et al. 2000), morfologicznych (Wack i Wimmer 2002, Zhang et al. 2002), aktywnej powierzchni (Elmqvist et al. 2002), predykcji liniowej (Pfeifer et al. 2001), czy aktywnego modelu TIN zaimplementowanego w oprogramowaniu Terrasolid (Axelsson 2000). Pokrycie terenu (drzewostan, infrastruktura) ma oczywiście wpływ na jakość tworzonych modeli, ale jest ona głównie uzależniona od zagęszczenia punktów pomiarowych oraz kąta padającego promieniowania i wielkości plamki. Badania dowodzą, iż nawet w pełni zwartych drzewostanach liściastych do gruntu dociera od kilkunastu do kilkudziesięciu procent wszystkich impulsów co jest wielkością w pełni wystarczającą do modelowania powierzchni terenu na dużych obszarach.

Celem pracy było zaprezentowanie możliwości automatyzacji procesów generowania różnych typów modeli terenu oraz pokrycia terenu w trudnych warunkach wysokogórskich na podstawie chmury punktów ALS.

2. TEREN BADAŃ

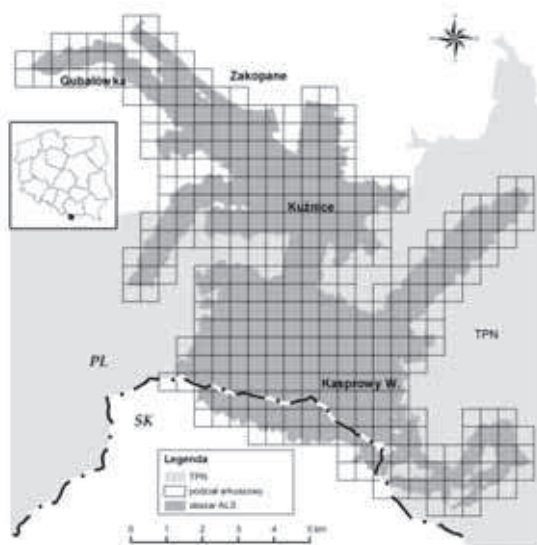
Teren badań o powierzchni 59,5 km² zlokalizowany był w Tatrach obejmując swym zasięgiem masyw: Kasprowego Wierchu, Kotły Goryczkowy i Gąsienicowy, Kuźnice, fragment centrum Zakopanego oraz stoki Gubałówki (Rys.1). Dane dla analizowanego obszaru Tatr (tereny użytkowane narciarsko) zostały pozyskane w celu monitorowania ewentualnego wpływu na środowisko, inwestycji jaką była modernizacja kolei linowej na szczyt Kasprowego Wierchu.

3. METODYKA

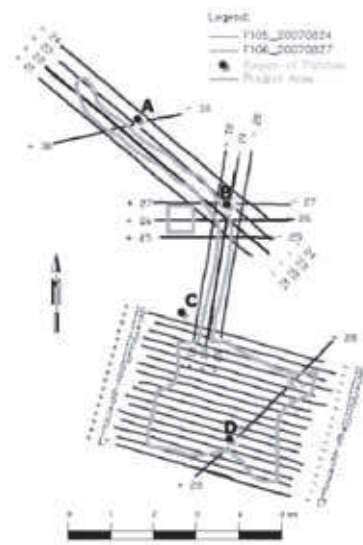
Dane ALS pozyskano w dniach 24 i 27.08.2007 roku, w 33 pasach nalotu przy zastosowaniu dwóch jednocześnie pracujących skanerów RIEGL LMS-Q560 podwieszonych w specjalnej platformie pod pokładem samolotu DA42 MPP. Skaner ten umożliwia zapisanie informacji o całej fali powrotnej sygnału (ang. *full waveform*), na podstawie której wykonawca pozyskał pierwsze (ang. *first echo; FE*) i ostatnie odbicie (ang. *last echo; LE*).

Łączenia skanów oraz wpasowania w układ odniesienia dokonano w oparciu o pomiary powierzchni planarnych (dachy budynków; Rys. 2). W tym celu użyto odbiornika dGPS (Leica 1230) oraz tachimetru bezlustrowego (Leica 407power). W celu zminimalizowania błędów pomiarowych, na terenie Dyrekcji TPN w Zakopanem, ulokowano lokalną stację bazową GPS, nawiązując ją do najbliższego punktu państwowej osnowy POLREF 0502. Do kontroli w procesie obliczeniowym wykorzystano także dane z sieci EUPOS-ASG („NTWG”). Dla każdego miejsca pomiaru (Rys. 2; oznaczenia literowe) określono położenie połaci dachów (min. 3) ustawionych w różnych płaszczyznach. Każda powierzchnia dachu wyznaczana była przez 6 do 10 punktów rozmieszczonych równomiernie, pomierzonych tachimetrem. Jednocześnie dokonano pomiarów punktów dostosowania (*GCP*) dla potrzeb przeprowadzenia orientacji zdjęć wykonywanych kamerą cyfrową Vexcel.

W procesie półautomatycznego generowania modeli: terenu (NMT) wykorzystano programy: pakiet oprogramowania Terrasolid (Terrasolid Ltd.), ER Mapper Professional 7.1 (ERDAS), Fusion (Pacific Northwest Research Station, USDA), LAStools (M. Isenburg, J. Shewchuk) oraz ArcGIS 9.2 (ESRI). W celu zautomatyzowania działań, część procesów przetwarzania realizowano w procesorze poleceń systemu operacyjnego Windows (Microsoft) w trybie wsadowym oraz korzystano z makropoleceń w Terrasolid.



Rys. 7. Obszar nalogu w Tatrach (TPN) i Zakopanem



Rys. 2. Lokalizacja powierzchni planarnych (dachy budynków, oznaczenia literowe) oraz szeregi nalogu obszaru badań

3.1. Przygotowanie danych do przetworzeń

Proces produkcyjny poprzedzono przygotowaniem odpowiedniej struktury danych jak samych katalogów dla wszystkich kombinacji: skanu (szeregu), źródła danych (numer skanera (*FW* - patrzący lekko w przód i *BW* – w tył) oraz numeru odbicia (*FE* lub *LE*). Dane przekonwertowano w trybie wsadowym z formatu ASCII do LDA. Format LDA jest stosowany przez program FUSION Pacific Northwest Research Station, USDA), które nie oferuje jednak możliwości zapisu identyfikatora kolejnego pasa nalogu (skanu), stąd dane musiały być przekonwertowane do formatu LAS (format binarny ASPRS). Ze względu na duży rozmiar plików ograniczono je do zasięgu terenowego 500·500 m tworząc tym samym 353 obszary robocze. W obrębie pojedynczego obszaru, dane połączono w jeden plik LAS w sekwencji: współrzędna X, Y oraz Z odbicia, numer odbicia (pierwsze = 1; ostatnie = 2), liczba odbić (2), numer pasa nalogu oraz identyfikator skanera. W procesie kontroli jakości modeli, informacje te pozwoliły autorom na identyfikację obszarów z błędnymi pomiarami.

3.2. Filtracja danych oraz generowanie DTM i DSM

Procesu filtracji plików LAS dokonywano pod nadzorem operatora, a dalsze kroki ich klasyfikacji oparto na półautomatycznym przetwarzaniu uruchamianych makropoleceniami (Terrasolid 2001). Pozwoliły one znacznie zaoszczędzić czas pracy operatora wykonując zadania w trybie wsadowym. Wynikowo punkty zostały pogrupowane w następujących klasach: „*low points*”, „*ground*”, „*low vegetation*”, „*medium vegetation*”, „*high vegetation*” oraz „*air points*” (błędne odbicia, elementy

infrastruktury kolei linowej, ptaki). Klasa „ground” pozbawiona tzw. *low points* (poniżej gruntu) zawierała punkty reprezentujące teren, na których oparto generowanie wynikowego NMT o oczku 1·1m (ASCII GRID). Sam proces czyszczenia oraz interpolacji punktów do regularnej siatki nie jest skomplikowany, jednak w przypadku stromych zboczy i skał oraz zwartego drzewostanu występowały problemy z efektywnym i automatycznym przeprowadzeniem procesów. Często dokonywano ponownej edycji punktów ALS (zmiana klas) doskonaląc generowane modele poprzez odpowiedni dobór prawidłowych parametrów interpolacyjnych (metoda TIN). W celu weryfikacji modeli często operator wspomagał się ortomozaiką CIR lub RGB (uzyskaną z przetworzenia zdjęć wykonanych kamerą Vexcel). W celu wygenerowania poprawnego NMPT reprezentującego powierzchnie aproksymującą wierzchnie warstwy koron drzew, kosodrzewiny czy roślinności alpejskiej (hale), chmurę punktów ALS poddano inwersji (mnożnik dla współrzędnej wysokościowej = -1), tak aby można było zastosować schemat przetwarzania analogiczny jak w przypadku NMT. W ten sposób tworzona była tymczasowa klasa „ground_inverse” zawierająca najwyżej położone w koronach punkty pomiarowe (po ponownym odwróceniu). Klasa ta podobnie jak „ground” wymagała kontroli operatora wspomagającego się w trudnych obszarach ortofotomozaiką cyfrową (RGB/CIR). Ważnym krokiem okazała się wcześniej przeprowadzona filtracja w kierunku poszukiwania *air points* i ich wyeliminowania w procesie tworzenia „ground_inverse”, a w efekcie NMPT. Kolejny kroki kontroli przeprowadzonych filtracji i wygenerowanych modeli prowadzono na obrazie cieniowanego reliefu (ang. *hillshade*), co pozwoliło operatorowi oprogramowania Terrasolid, na kontrolę poprawności modeli oraz ewentualną kolejną edycję klas „ground” oraz „ground_inverse”. Obraz hillshade generowano w oprogramowaniu ER Mapper Professional 7.1.

3.3. Generowanie modelu znormalizowanego

Oprogramowanie ER Mapper posłużyło także w procesie generowania produktu pochodnego, ale niezwykle ważnego w analizie klas pokrycia terenu czy określaniu jakości filtracji i klasyfikacji (kontrola różnicy NMPT-NMT). Stosując odpowiedni algorytm różnicy dwóch warstw rastrowych otrzymano znormalizowany NMPT przyjmując rozmiar piksela wynikowego 1x1 m. Prezentuje on wysokości względne obiektów występujących na gruncie w obszarze opracowania, do których najczęściej zaliczyć można było: drzewa, kosodrzewinę, budynki, podpory oraz krzeselka i wagony wyciągów narciarskich, linie energetyczne etc).

4. WYNIKI

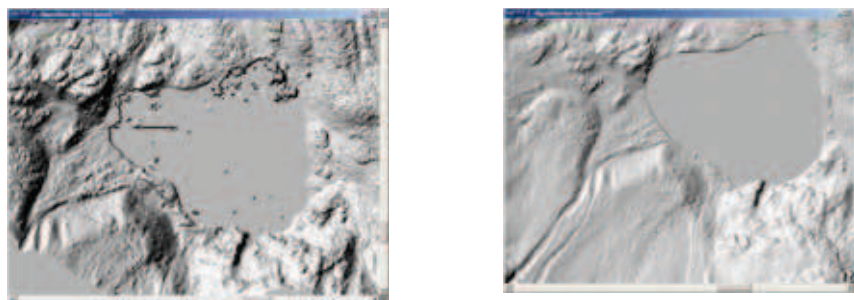
Łącznie podczas nalotu ALS pozyskano niemal 1.5 miliarda punktów pomiarowych o współrzędnych XYZ, osiągając średnie zagęszczenie na bardzo wysokim poziomie ok. 22 pkt/m². Maksymalne zagęszczenie punktów w miejscach pokrywania się kilku skanów wyniosło aż 80 pkt/m². Wykonawca nalotu ALS dokonał połączenia (ang. *matching*) poszczególnych skanów ze sobą oraz ich transformacji do przyjętego układu współrzędnych (UTM 34N stosowanego w parkach: TPN i TANAP). Połączenie skanów polegało na wpasowaniu „chmury punktów” w oparciu o pomierzone powierzchnie planarne. Metoda ta stosowana jest w Austrii i zastępuje punkty wiążące, tzw. powierzchniami wiążącymi (Kager 2004). Wśród danych ALS

identyfikacja homologicznych punktów na poszczególnych skanach, jest zwykle niemożliwa, dlatego poszukuje się prostych geometrycznych kształtów, które można jednoznacznie wskazać. Idea pasowania płaszczyzn polega na wyborze trzech homologicznych powierzchni planarnych, a uzyskany efekt wpasowania jest analogiczny jak tradycyjne wyrównywanie bloku zdjęć lotniczych w oparciu o punkty wiążące. Optymalne płaszczyzny homologiczne to takie, które przecinają się pod kątem prostym, a ich nachylenia są przeciwległe. Wyniki wpasowania chmury punktów ALS na podstawie pomiarów (dGPS + tachimetr) powierzchni planarnych wskazują na wysoką precyzję wykonania samego skaningu i pomiarów naziemnych (Tabela 1). Największe błędy dotyczyły współrzędnych X (0.28 m; skan numer 16) oraz Y (0.13 m; skan numer 3), a współrzędna wysokościowa obciążona była błędem (0.14 m) w przypadku skanu o numerze 15, co wykazano na powierzchni planarnej C.

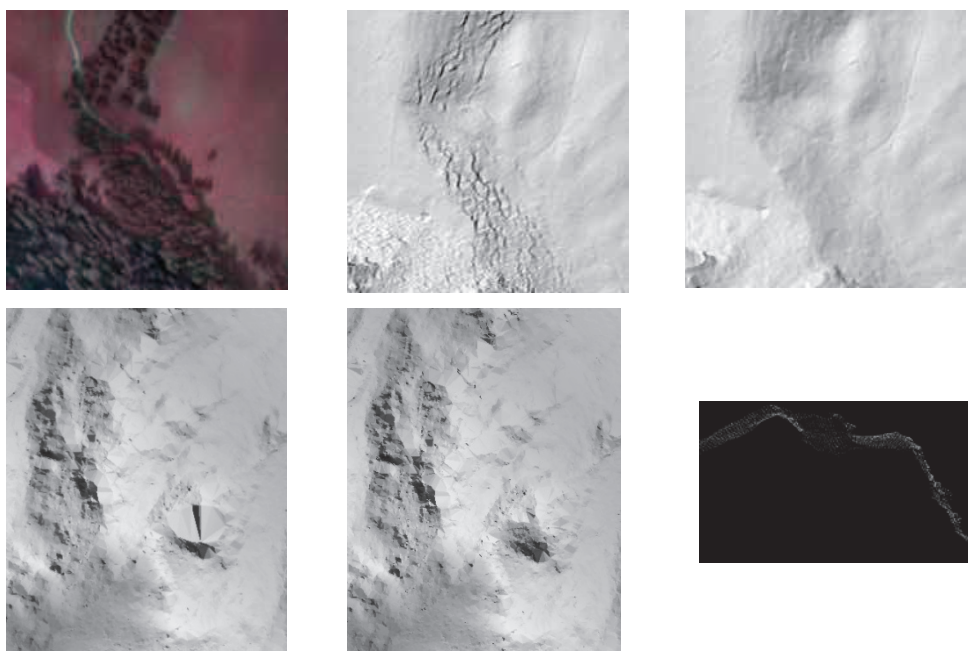
Tabela 1. Odchyłki wpasowania chmury punktów ALS określone na powierzchniach planarnych

Obszar pomiarowy (min. 3 dachy budynków)	Numer szeregu (skan)	dY [m]	dX [m]	dZ [m]
A	24	0.01	0.02	0.02
	30	-0.09	0.20	0.03
B	23	0.06	-0.02	0.07
C	15	0.05	-0.10	0.14
	16	0.02	0.28	0.06
D	3	0.13	0.06	-0.02
	4	0.03	0.08	0.04
	17	-0.05	0.23	-0.02
E	4	0.00	-0.09	-0.10
	12	0.03	-0.03	-0.11
	13	0.04	0.01	-0.12

Zdarzało się, iż niektóre punkty pomiarowe były błędne (ang. *air points*, np. przypadki ptaków w powietrzu) lub brak było sygnału powracającego (problemy pochłaniania sygnału przez wodę; Rys. 3). Sytuacja błędnego zaklasyfikowania punktów do odpowiedniej klasy skutkowałą generowaniem niedoskonałego modelu. Najczęściej takie przypadki zachodziły dla kęp kosodrzewiny rosnącej na półkach skalnych, czy też w przypadku modelowania stromych zboczy porośniętych przez drzewostan nieprzepuszczający wystarczającej ilości płamek lasera do gruntu. W takich przypadkach nieodzowna była manualna edycja punktów lub zmiana parametrów tworzenia TIN (maksymalny rozmiar trójkąta) prowadzona na nowo przez operatora (Rys. 4).



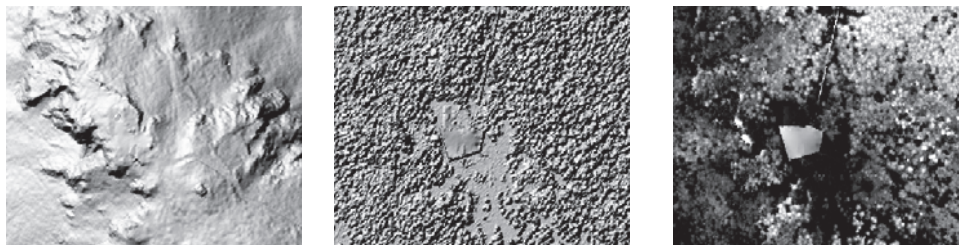
Rys. 3. Fragment NMT przed (z lewej) oraz po manualnej klasyfikacji punktów ALS (z prawej)



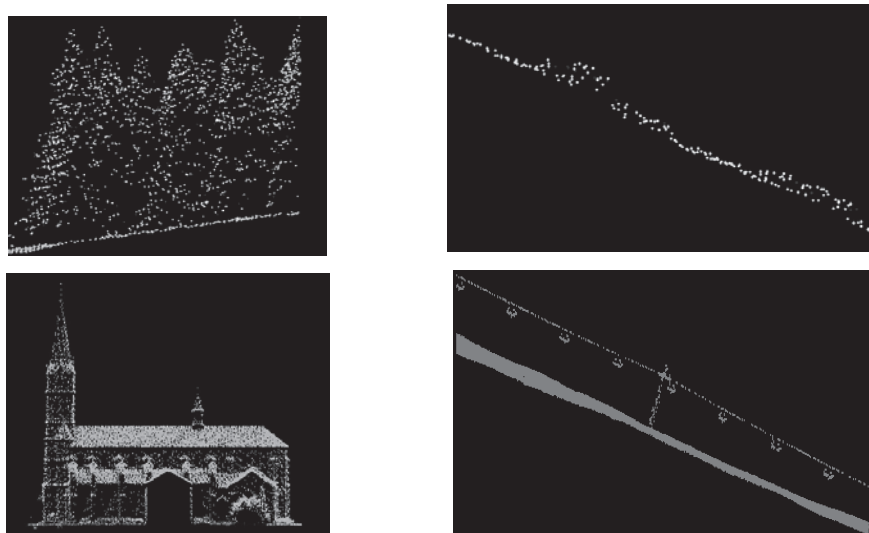
Rys. 4. Proces doskonalenia modeli: u góry od lewej: ortomozaika w kompozycji CIR, NMT z błędami interpolacji, NMT po edycji; na dole od lewej: NMT z „obciętą” skalą w wyniku zakwalifikowania punktów do błędnej klasy, poprawiony model, przekrój przez chmurę punktów

W wyniku opracowania schematu przetwarzania klasy *inverse ground*, otrzymywano modele NMPT, które dla poszczególnych obszarów były kontrolowane przez operatora w procesie nakładania transparentnej ortomozaiki CIR lub RGB. Ta interaktywna kontrola pozwoliła na szybką identyfikację niewielkich błędów automatycznej klasyfikacji obiektów (dachów domów, koron drzew) pokrycia terenu (Rys. 4 i 5). Problemem przy tworzeniu znormalizowanego NMPT, jest zaklasyfikowanie takich obiektów występujących nad gruntem jak: linie energetyczne czy liny kolei narciarskiej. Ich uwzględnienie zależy to od odbiorcy końcowego

produktów, stąd należy liczyć się z koniecznością generowania modeli w różnych wariantach. Efektem końcowym prac było wygenerowanie dla każdego obszaru roboczego, modeli: NMT, NMPT oraz znormalizowanego NMPT (Rys. 5).



Rys. 5. Fragment modeli: NMT, NMPT oraz znormalizowany NMPT (Myślenickie Turnie)



Rys. 6. Przykłady klas pokrycia terenu (profile przez chmurę punktów ALS) uczestniczących w generowaniu NMPT w obszarze opracowania. U góry: drzewostan świerkowy i płaty kosodrzewiny. U dołu: kościółek w Zakopanem oraz kolej krzeselkowa w Kotle Gąsienicowym

5. WNIOSKI

Wyniki osiągnięte podczas opracowania zautomatyzowanego procesu przetwarzania chmury punktów ALS, pozwoliły na wyciągnięcie określonych wniosków dotyczących technologii ALS oraz jej przydatności w generowaniu numerycznych modeli terenu. Modele konstruowane w oparciu o pełną automatyzację z użyciem algorytmów, niestety nie są wolne od błędów. Szczególnie w terenach wysokogórskich charakteryzujących się występowaniem zwartej szaty roślinnej (drzewostan, kosodrzewina), turni, skal i piargów porośniętych roślinnością wymagana jest interwencja operatora. Pomimo pewnych ograniczeń, duża część procesów

przetwarzania danych daje się zautomatyzować, co pozwala na pełne wykorzystanie sprzętu komputerowego przy zapewnieniu jedynie odpowiedniej przestrzeni na dyskach twardej. Lotniczy skaningu laserowy pozwala w stosunkowo krótkim pozyskać dane dla dużego obszaru z niespotykaną dotąd liczbą punktów pomiarowych. Uzyskiwane modele: NMT, NMPT oraz znormalizowany NMPT są w pełni weryfikowalne i w znakomitej części obiektywne. Automatyczna klasyfikacja chmury punktów ALS przebiegająca od aproksymowanej powierzchni gruntu może prowadzić nawet do wyznaczenia poszczególnych pięter roślinnych w oparciu o atrybut wysokości względnej obiektu (np. kosodrzewina, górna granica lasu, itp.). Technologia skaningu laserowego otwiera przed geomorfologią czy kartografią nowe możliwości analizy i wizualizacji form terenowych w obszarach o urozmaiconej rzeźbie. Określenie jakości modeli terenu w obszarach górskich (w Polsce zwykle zalesionych) nie było dotąd tematem szczegółowych badań podejmowanych przez geodetów, ze względu na brak odpowiednich technologii. Wraz z pojawieniem się aktywnych systemów teledetekcyjnych takich jak *LiDAR* (ALS) czy radar, otwierają się jednak możliwości pozyskiwania danych referencyjnych o rzeźbie (NMT) oraz NMPT oraz generowanie na ich podstawie modelu znormalizowanego NMPT, znajdującego odbiorcę w wielu badaniach naukowych.

6. LITERATURA

- Terrasolid. 2001. Tutorial TerraScan, TerraPhoto, TerraModel: <http://www.terrasolid.fi>
- Axelsson P., 2000. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Vol. XXXIII/4B, Amsterdam.
- Baltsavias E. P., 1999a. Airborne laser scanning: Basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54 (2-3), 199-214.
- Baltsavias E.P. 1999b. A comparison of between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 54:83-89.
- Ducic V., Hollaus M., Ullrich A., Wagner W., Melzer T., 2006. 3D Vegetation Mapping and Classification using Full-Waveform Laser Scanning. International Workshop "3D Remote Sensing in Forestry", Vienna, Austria, s. 211-217.
- Elmqvist, M., Jungert, E., Lantz, F., Persson, Å., Söderman, U., 2001. Terrain modelling and analysis using laser scanner data. Estimation of laser radar data using active shape models. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 34-3/W4, pp. 219-227.
- Hyypä J., Pyysalo U., Hyypä H., Samberg A., 2000. Elevation accuracy of laser scanning-derived digital terrain and target models in forest environment. In Proceedings of the EARSeL-SIG-Workshop on LIDAR, June 16-17, Dresden, Germany pp. 139-147.
- 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.
- Kager H., 2004. Discrepancies between overlapping laser scanner strips – simultaneous fitting of aerial laser scanner strips. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Istanbul, Turkey, Vol. XXXV, Part B/1, pp.555-560.

- Lee H. S., Younan N. H., 2003. DTM extraction of lidar returns via adaptive processing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol: 41 (9 PART I), pp.2063-2069.
- 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.
- 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.
- St-Onge B., Hu Y., Véga C., 2006. Reconstruction of Forest Canopy Height Using Stereo-IKONOS panchromatic Images and a Lidar DTM. Int. Workshop "3D Remote Sensing in Forestry", Vienna, Austria, pp. 97-102.
- Wack R., Wimmer A., 2002. Digital terrain models from airborne laser scanner data – a grid based approach. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV / 3B, Graz.
- Wehr A. i Lohr U., 1999. Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol: 54 (2-3), 164-198.
- Węzyk P., 2006. Wprowadzenie do technologii skaningu laserowego lidar w leśnictwie. *Annals of Geomatics*. Vol. IV. Number 4., s. 119-132.
- Węzyk P., Tompalski P., Szostak M., Glista M., Pierzchalski M., 2008. Describing the selected canopy layer parameters of the Scots pine stands using ALS data. *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2008*, Edynburg, September 17-19, 2008 (in print).
- Zhang K., Chen S., Whitmann D., Shyu M., Yan J., Zhang C., 2002. A progressive morphological filter for removing non-ground measurements from airborne LIDAR data. *Journal of Latex Class Files*. Vol.1(8).

**GENERATION OF DIGITAL SURFACE AND TERRAIN MODELS OF THE
TATRAS MOUNTAINS BASED ON AIRBORNE LASER SCANNING (ALS)
POINT CLOUD**

KEY WORDS: ALS, DTM, DSM, nDSM, Tatra Mountains

Summary

The work presented was aimed at constructing a semi-automatic work-flow of Digital Surface Model (DSM) and Digital Terrain Model (DTM) generation based on an ALS point cloud gathered in a very difficult mountain area. The study area located in the Polish part of the Tatra Mountains covered about 60 km² and included the Kasprowy Wierch, Kuźnice, and downtown Zakopane with the Gubałówka. ALS data, collected in 2007, consisted of 33 scans (minimum density of 20 points/m²). To combine all the scans and match them to the coordinate system, planar surfaces (building roofs) were measured using a tachimeter and a dGPS survey. Position errors of the ALS points in the horizontal plane varied from -0.09m to +0.28m; height errors ranged from -0.12m to 0.14m (HAE). The operator delivered the data separately from 2 Riegl Q-560 scanners, for every FE and LE. The ALS files, due to their huge size, were divided into smaller ones and generated 353 sheets (500x500 m in size) for every scanner and number of returns combination. The point cloud was filtered and assigned to the following levels: "low points", "ground", "low vegetation", "medium vegetation", "high vegetation" and "air points". To generate a DSM, a special class called "ground_inverse" was created; it required an operator control supported by a digital orthophoto (RGB\CIR; Vexcel camera). For every sheet processed, the DTM and DSM were generated. Those verified models served as a basis for developing an nDSM model using the ER Mapper software. The nDSM shows relative heights of objects in the study area (forest stands, dwarf mountain pines, buildings, power lines, ski lifts, etc.). Development of a precise DSM and nDSM as well as analyses of the nDSM open new perspectives for numerous scientific projects.

dr inż. Piotr Wężyk
rlwezyk@cyf-kr.edu.pl
tel. +48 (0) 12 662 50 82
faks.: +48 (0) 12 662 50 82

mgr inż. Natalia Borowiec
e-mail: nboro@agh.edu.pl
tel. +48 (0)12 617 39 93

mgr inż. Stanisław Szombara, Robert Wańczyk
e-mail: ss@progea.pl
tel. +48 (0) 12 415 06 41