

I. Borowiecki
Akademia Rolnicza w Krakowie

ANALIZA DOKŁADNOŚCIOWA LOTNICZEGO SKANINGU LASEROWEGO NA OBIEKCIE WZGÓRZE WAWELSKIE

©Borowiecki I., 2007

In the article a technology of the aerial laser scanning was characterized as well as the precision analysis of the laser scanning (Lidar) of the Royal Castle on the Wawel Hill. The precision analysis was based on the calculation of the mean square error RMSE and comparative analysis of the lidar and photogrammetric data.

1. Wprowadzenie

Rosnące zapotrzebowanie na uporządkowane i usystematyzowane informacje przestrzenne wymusza proces rozwoju technologii informatycznych oraz nowoczesnych metod pozyskiwania, przetwarzania i udostępniania danych.

W trójwymiarowych systemach informacji przestrzennej wykorzystywane są numeryczne modele terenu NMT, które dostarczają informacji o terenie i umożliwiają jego wizualizację. Dane źródłowe dla potrzeb opracowywania numerycznego terenu pozyskuje się metodą pomiarów bezpośrednich, metodą kartograficzną, metodą fotogrametryczną oraz innymi technicznie uzasadnionymi metodami.

Do innych technicznie uzasadnionych metod zaliczamy między innymi technologie lidarowe, które dzięki dynamicznemu rozwojowi i nieustannemu unowocześnianiu znajdują coraz liczniejsze zastosowania, zwłaszcza dla celów pozyskiwania informacji przestrzennej dotyczącej dużych obszarów, np.: pomiar lidarowy miasta Wrocławia i Krakowa (Wywiad GEODETY 2007), (Bucior i inni 2006).

W opracowaniu przedstawiono technologię lotniczego skaningu laserowego jako metody pozyskiwania danych dla celów tworzenia numerycznego modelu terenu oraz przeprowadzono analizę dokładnościową danych uzyskanych z pomiarów lidarowych Zamku Królewskiego na Wawelu, polegającą na wyliczeniu średniego błędu kwadratowego $RMSE_z$ (wykorzystano współrzędne z pomiaru fotogrametrycznego dachów Krakowa).

2. Technologia lotniczego skaningu laserowego

2.1. Architektura systemu Lidar

Lotniczy skaningu laserowy LIDAR (Light Detection And Ranging) polega na pomiarze odległości z lecącego samolotu lub helikoptera do punktów powierzchni terenu.

Metodę lidarową cechuje między innymi wysoka dokładność danych wysokościowych, znaczna niezależność od warunków pogodowych, możliwość przenikania przez warstwę roślinności i niezależność od warunków oświetleniowych.

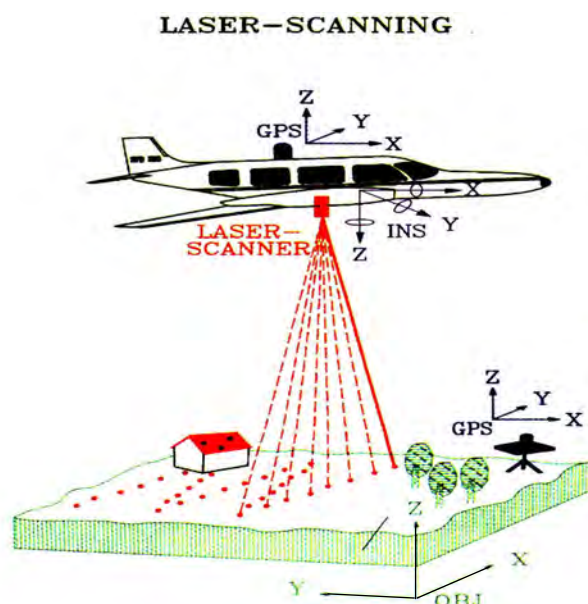
System LIDAR składa się z wyposażenia statku powietrznego oraz wyposażenia naziemnego (ryc.1).

Wyposażenie statku powietrznego:

- nadajnik (dalmierz laserowy) i odbiornik rejestrujący dane,
- inercyjny system nawigacyjny (INS),
- system pozycjonowania trajektorii lotu (GPS),
- kamera wideo,
- system planowania i zarządzania lotem.

Wyposażenie naziemne:

- naziemne stacje referencyjne GPS,
- stacja robocza do przetwarzania danych.



Ryc.1. System LIDAR (Hans-Erik Andersen, 2002)

Umieszczony w samolocie dalmierz laserowy (LRF – Laser Range Finder) skanuje powierzchnię ruchem wahadłowym w kierunku prostopadłym do toru lotu.

Odległość od dalmierza do punktów powierzchni terenu uzyskuje się rejestrując różnicę czasu pomiędzy wysłanym impulsem laserowym oraz jego odbitym echem. Duża gęstość terenowych punktów pomiarowych umożliwia otrzymanie trójwymiarowej przestrzeni reprezentującej powierzchnię terenu i jego pokrycie. Współrzędne X, Y, Z dalmierza laserowego wyznacza współpracujący z nim system GPS. Nachylenie katowe platformy (kierunek w przestrzeni), na której umieszczona jest głowica sensora, określa INS (inercyjny system nawigacyjny).

Odpowiednie przetworzenie danych uzyskanych z wyżej wymienionych systemów (system pomiaru odległości, GPS, INS) pozwala na otrzymanie współrzędnych X, Y, Z punktów terenowych.

Wyposażenie samolotu stanowi również kamera wideo rejestrująca pas terenu poddany skaningowi, co znacznie upraszcza późniejszą interpretację pomiaru, porównanie wyniku skanowania z terenem oraz ewentualną filtrację danych.

Olbrzymia liczba danych, uzyskanych z wielokrotnie odbitych fal laserowych podlega oczyszczaniu (filtrowaniu) i w 95% następuje automatycznie (Kurczyński 1999), pozostałe 5% odbywa się na zasadzie ręcznej edycji, co z kolei stanowi podstawowy składnik kosztów technologii lotniczych pomiarów lidarowych (około 60%) (Manue i inni 2001).

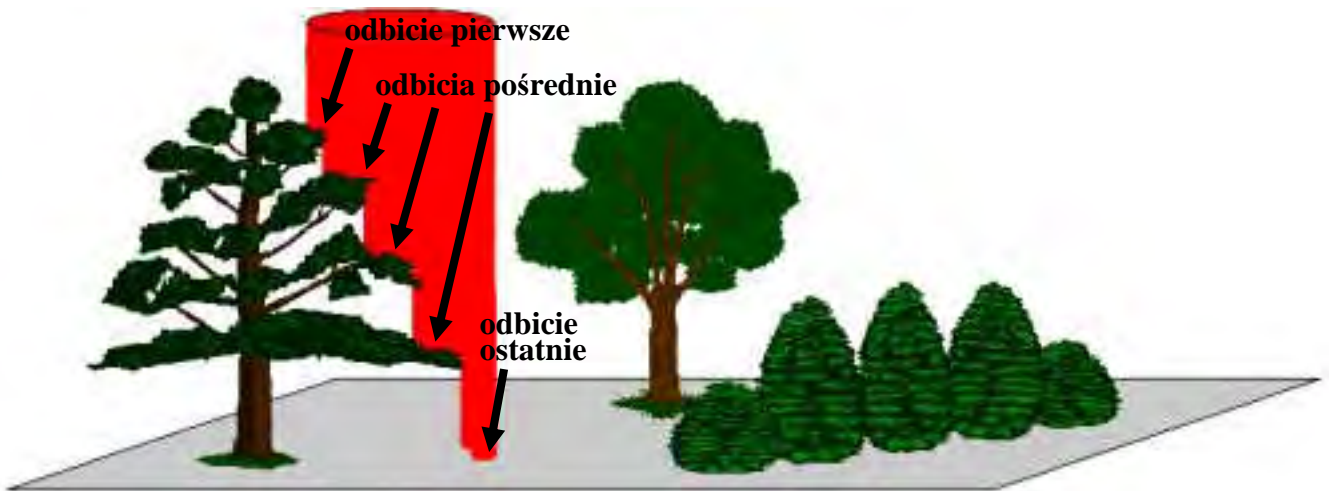
Dla wyliczenia i wyeliminowania błędów systematycznych współrzędnych X, Y i Z należy wybrać punkty kontrolne, o co najmniej trzykrotnie dokładniejszych współrzędnych przestrzennych i przeprowadzić analizę dokładności w oparciu o powyższe punkty np. zaniwelowanie na terenie objętym pomiarem lub w jego bezpośrednim pobliżu płaszczyzny referencyjnej (boisko sportowe lub duży parking) (Tarek 2002).

2.2. Rejestracja wielokrotnych odbić pojedynczego impulsu lasera i intensywności odbicia

Na terenach odkrytych impuls lasera po odbiciu od powierzchni terenu powraca i jest rejestrowany, w przypadku terenów pokrytych roślinnością (drzewa, krzewy, itp.) powracające impulsy lasera są odbite zarówno od powierzchni terenu jak i obiektów na nim się znajdujących (np.: korony drzew).

Analiza pośrednich odbić lasera wraz z ich intensywnością np. analiza pierwszego odbicia od korony drzewa, potem gałęzi i na końcu ostatniego odbicia od gruntu, umożliwia klasyfikację obiektów oraz tworzenie DTM-u dla terenów zadrzewionych.

Około 20 – 30% impulsów laserowych latem i 70% zimą dociera do gruntu poprzez korony lasu szpilkowego (Kurczyński, Preuss 2003) (Kurczyński 2006). Współczesne systemy lidarowe rejestrują nawet do 7-9 odbić tego samego impulsu laserowego i ich intensywność (ryc. 2).



Ryc. 2. Wielokrotne odbicie pojedynczego impulsu lasera

2.3. Metody filtracji danych lidarowych

W celu uzyskania rzeczywistego przebiegu powierzchni topograficznej należy wykonać filtrację danych laserowych polegającą na usunięciu z chmury punktów, tych które nie leżą na powierzchni terenu (budynki, drzewa, samochody i inne). Ze względu na trudności związane z prawidłową interpretacją punktów, zwłaszcza na obszarach urozmaiconych (tereny o dużym stopniu zurbanizowania lub obszary pokryte gęstą roślinnością), niezbędny jest nadal interaktywny udział operatora, co stanowi jeden z istotnych składników kosztów etapu postprocessingu.

Opracowano wiele algorytmów służących do automatycznej filtracji danych laserowych, do najważniejszych z nich zaliczamy algorytmy wykorzystujące metody analizy obrazu cyfrowego oraz wykorzystujące metody interpolacji.

Do algorytmów wykorzystujących metody analizy obrazu cyfrowego zaliczamy (Marmol 2006):

- FFT (Marmol 2003),
- filtry morfologiczne (Zhang i inni 2002), (Vosselman i inni 2001),
- segmentacja (Roggero 2002),
- metody gradientowe (Hyypä i inni 2002), (Wack, Wimmer 2002),
- modelowanie aktywnych powierzchni (Elmqvist 2002).

Do algorytmów wykorzystujących metody interpolacji należy (Marmol 2006):

- predykcja liniowa (Pfeifer i inni 2001),
- interpolacja krzywymi sklejanymi (Brovelli i inni 2002),
- aktywnego modelu TIN (Axelsson 2000).

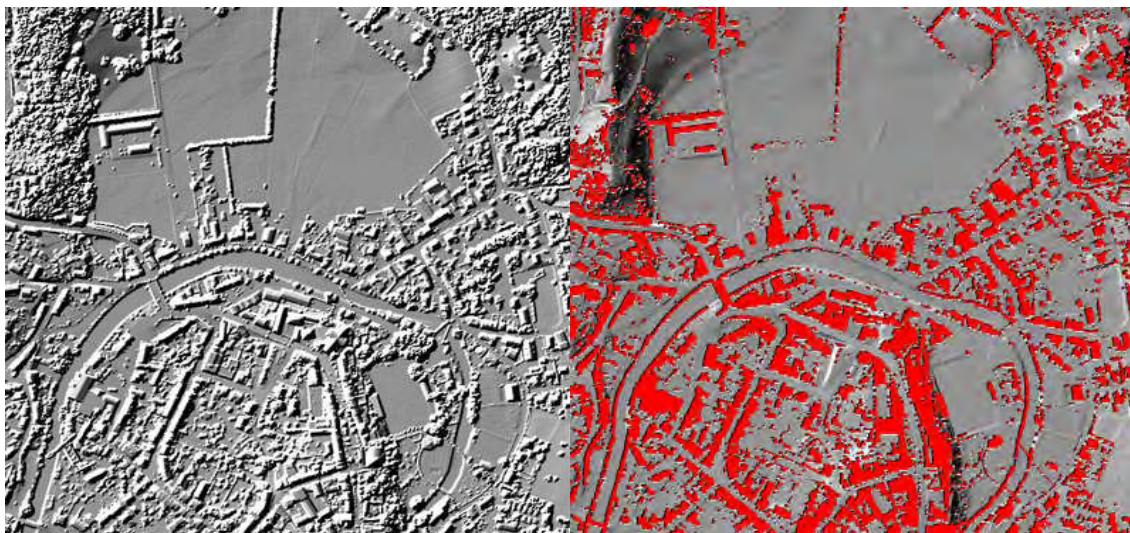
Pomimo licznych badań nie zaprojektowano jeszcze algorytmu o 100% efektywności, który bezbłędnie filtrowałby dane lotniczego skaningu laserowego, prowadząc do uzyskania rzeczywistego przebiegu powierzchni topograficznej. Poprawność działania poszczególnych metod filtracji jest uzależniona przede wszystkim od ilości obiektów znajdujących się na powierzchni terenu, im bardziej obszar jest urozmaicony, tym zwiększa się ilość błędów w procesie automatycznej filtracji danych lidarowych.

2.4. Zastosowania lotniczego skaningu laserowego

Zalety lotniczego skaningu laserowego przyczyniają się do popularyzacji powyższej techniki pośród innych dotychczas wykorzystywanych metod pozyskiwania danych o rzeźbie terenu. Techniki lidarowe są szczególnie opłacalnymi w przypadku większych obszarów, gdzie duże znaczenie posiada wydajność i szybkość całego procesu uzyskania produktu końcowego.

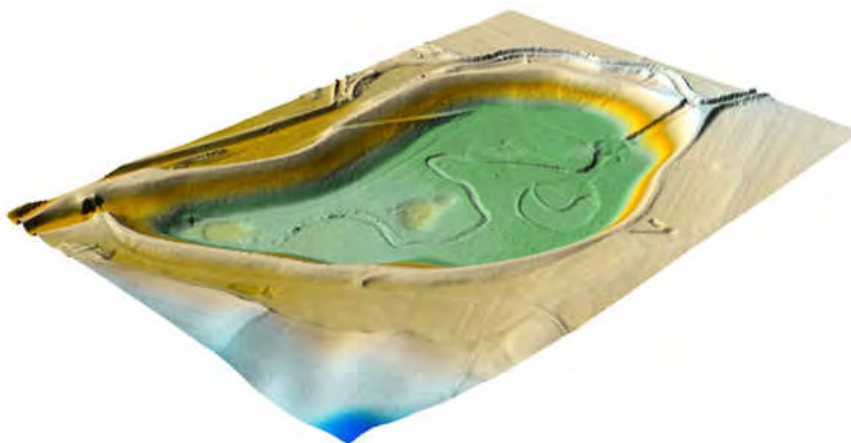
Do ważniejszych zastosowań lotniczego skaningu laserowego możemy zaliczyć (Manue i inni 2001), (Kurczyński Z, Pruss R. 2003):

- inwentaryzacje i konserwacje, projektowanie przebiegu linii energetycznych, dróg, torów, rurociągów, wałów przeciwpowodziowych i innych wydłużonych obiektów infrastruktury,
- budowa przestrzennego modelu DSM aglomeracji miejskich 3D i DTM dla różnych potrzeb (ryc. 3),



Ryc. 3. Model DSM i DTM, na czerwono zaznaczono odfiltrowane dane z obiektów na powierzchni (budynki, drzewa) (www.toposys.com)

- obrazowanie obszarów kopalń odkrywkowych, wyznaczanie pojemności zbiorników (ryc. 4),



Ryc. 4. Zbiornik przeciwpowodziowy w 3D (www.toposys.com)

- planowanie przestrzenne,
- pomiary mas ziemnych (hałdy, wysypiska, itp.),
- generowanie modeli terenu dla terenów leśnych (np. zarządzanie drzewostanem: wysokość drzew, średnica korony, gęstość zalesienia, oszacowanie biomasy, określanie granic lasu, itp.).

3. Analiza dokładnościowa skaningu laserowego lidaru Zamku Królewskiego na Wawelu

Dokładność systemu LIDAR wyrażona w postaci średniego błędu kwadratowego wysokości, wynosi ≈ 15 cm przy pułapie lotu do 1200 m oraz ≈ 25 cm przy pułapie powyżej 1200 m, przy czym duży wpływ na dokładność wywiera głównie nachylenie terenu (Kraus, Pfeifer 1998).

Przeprowadzone badania i analizy dokładnościowe pomiaru lidarowego obiektu Zamek Królewski na Wawelu wykazały większą dokładność wyznaczenia wysokości od współrzędnych sytuacyjnych, dlatego w dalszych badaniach skoncentrowano się przede wszystkim na współrzędnej Z.

Analiza dokładnościowa polegała na obliczeniu średniego błędu kwadratowego (Root Mean Square Error) wysokości RMSE_z:

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum (z_1 - z_0)^2}{n}} \quad (1)$$

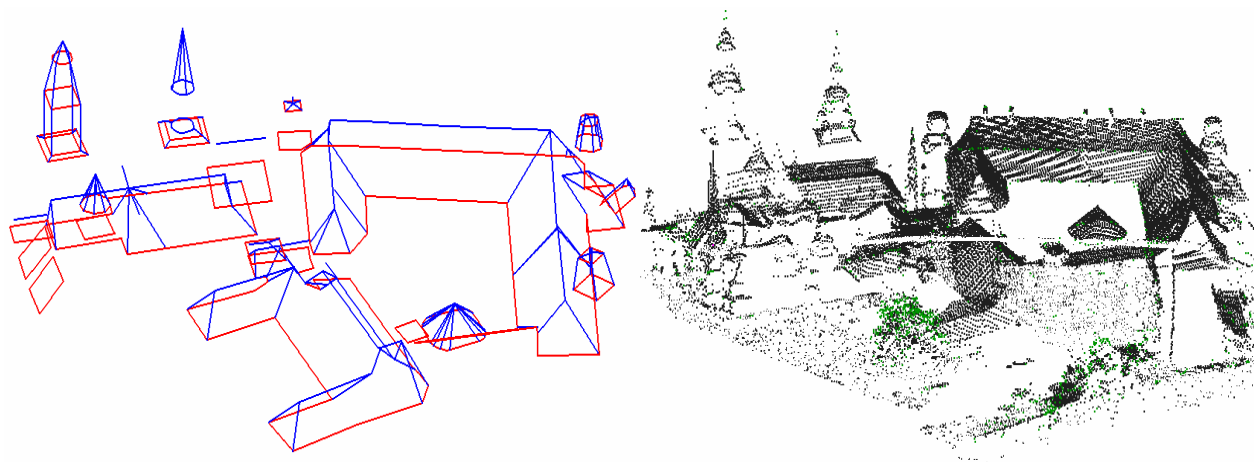
gdzie:

z_1 - wysokość mierzona (metoda lotniczego skaningu laserowego LIDAR),

z_2 - wysokość referencyjna (metoda fotogrametryczna),

n – ilość porównywanych punktów.

Do wykonania analizy dokładnościowej zastosowano współrzędne przestrzenne (ryc .5) otrzymane dwoma niezależnymi technikami (metodą fotogrametryczną i lidarową – dane źródłowe w tabeli 1).



Ryc. 5. Dane z pomiarów fotogrametrycznych oraz skaningu laserowego

Tab. 1. Pochodzenie danych źródłowych

Parametry	Metoda fotogrametryczna	Lotniczy skaningu laserowy
Pochodzenie danych	Pomiar fotogrametryczny dachów budynków centrum Krakowa	Pomiar metodą skaningu laserowego fragmentu miasta Krakowa
Format danych	Linie szkieletowe, plik dgn	Plik binarny bin
Układ współrzędnych	Lokalny Układ Krakowski, wysokość normalna	UTM 33, wysokość elipsoidalna, ETRF '89
Uwagi	Stereodigitalizacja ze zdjęć lotniczych w skali 1:13000 (2004 r.)	Pomiar przeprowadzony przy użyciu systemu TopEye MK II, parametry: wysokość lotu średnio 530 m, kąt skanowania 14 – 20, częstotliwość impulsu 50 kHz, plan nalotu: 9 pasów o szerokości 200m, pokrycie ≈ 50 m

Wykonane badania dokładności współrzędnej Z składały się z następujących etapów:

- transformacja współrzędnych punktów XY (pomiar fotogrametryczny) z układu lokalnego krakowskiego do PUWG 1992 oraz wysokości normalnej do elipsoidalnej,
- transformacja współrzędnych punktów XY (pomiar lidarowy) z układu UTM 33 do PUWG 1992, wysokości elipsoidalne pozostają bez zmian,
- wyznaczenie na modelu 3D punktów z pomiaru lidarowego odpowiadających punktom z pomiaru fotogrametrycznego (naroża dachów zabudowy Zamku Królewskiego na Wawelu),
- analiza dokładnościowa czyli obliczenie RMSE_z dla wysokości Z (pomiar lidarowy).

3.1. Transformacje współrzędnych

Współrzędne punktów referencyjnych X, Y (pomiar fotogrametryczny) przeliczono z lokalnego Układu Krakowskiego do PUWG 1992, wykorzystując aplikację Unitrans. Przeliczenie współrzędnych przeprowadzone zostało z uwzględnieniem korekt układu 1965 (Kadaj 2000):

$$\mathbf{xy_lok} \xrightarrow{\text{z korektą}} \mathbf{xy65} \xrightarrow{\text{z korektą}} \mathbf{xy92} \quad (2)$$

Współrzędną Z punktów referencyjnych (pomiar fotogrametryczny) przeliczono z wysokości normalnej poprzez elipsoidę Krasowskiego na wysokość elipsoidalną GRS-80 (WGS-84) układ odniesienia ETRF'89 stosując aplikację Unitrans i Geoida. Przeliczenie współrzędnych przeprowadzone zostało dwoma metodami, uzyskując identyczne wyniki (Kadaj 2000):

$$\mathbf{xy_lok} \xrightarrow{\text{z korektą}} \mathbf{xy65} \xrightarrow{\text{z korektą}} \mathbf{blh42(Krasowski)} \xrightarrow{\substack{\text{zastąpienie zerowej wysokości} \\ \text{Krasowskiego wysokością normalną}}} \mathbf{blh92(GRS-80)} \quad (3)$$

$$\mathbf{bl} \longrightarrow \mathbf{bln} \quad \text{odstępy wysokości normalnej od wysokości elipsoidalnej GRS-80 (WGS-84) układ odniesienia ETRF'89 dodano do wysokości normalnych}$$

$$\mathbf{xy92} \longrightarrow \mathbf{blh92(GRS-80)} \quad \text{zastąpienie ostatniej kolumny wysokościami normalnymi} \quad (4)$$

$$\mathbf{blh_n} \longrightarrow \mathbf{blh_e} \quad \text{bezpośrednie przeliczenie wysokości normalnych na wysokości elipsoidalne GRS-80 (WGS-84) układ odniesienia ETRF'89}$$

Transformację współrzędnych lidarowych z układu UTM (ETRF'89) 33N (15E) do PUWG 1992 zdefiniowano przy wykorzystaniu programu TerraScan. Do zdefiniowania układu PUWG 1992 zastosowano parametry: odwzorowanie Transverse mercator/Gaus Krüger, skala 0.9993, przesunięcie poziome 500000, przesunięcie pionowe 5300000, południk osiowy (środkowy) 19° (Wytyczne techniczne G-1.10, 2001).

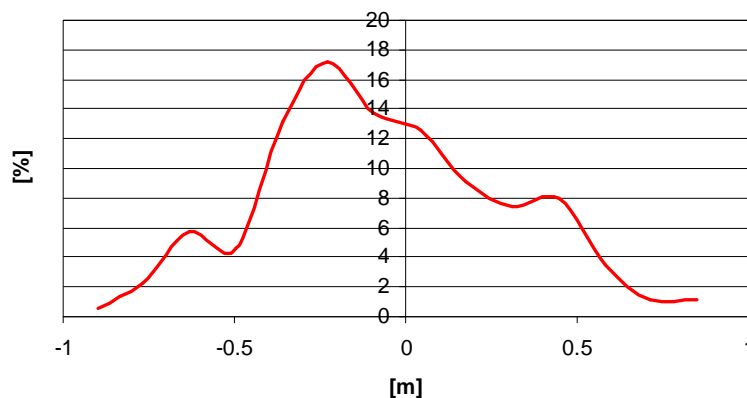
3.2. Wyznaczenie punktów przestrzennych na lidarowym modelu 3D Zamku Królewskiego

Do osadzenia punktów na modelu 3D badanego obszaru zostały wykorzystane produkty programistyczne firmy TerraSolid (TerraScan i TerraModeler). Przy pomocy narzędzia *Display Shaded Surface* wykonano wizualizację modelu 3D, do osadzenia punktów na narożach dachów budynków zastosowano funkcję *Mouse Point Adjustment* (narzędzie umożliwia umieszczenie elementów w określonym położeniu lub na odpowiedniej wysokości punktów laserowych). Wybranie opcji *Point / Closest* pozwala na osadzenie punktu w miejscu najwyżej położonym na modelu, w ustawionym wcześniej promieniu poszukiwań (*Within*).

3.3. Analiza dokładnościowa

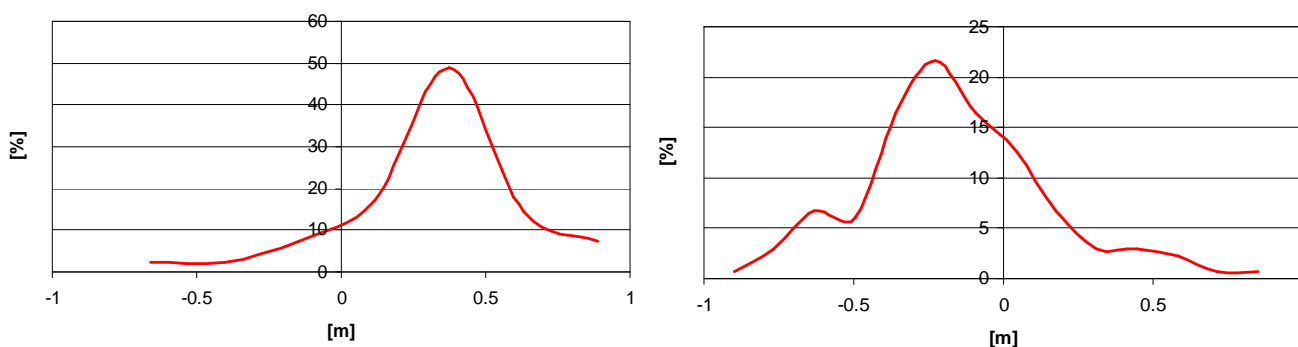
Analiza dokładnościowa polegała na porównaniu ze sobą danych z pomiaru lidarowego (punkty porównawcze) z danymi z pomiaru fotogrametrycznego (punkty referencyjne o wyższej dokładności). Wyznaczone odchyłki (pomiędzy wysokościami punktów porównawczych i referencyjnych) mają charakter błędów systematycznych, które usunięto odejmując od nich średnie odchyłki dla wszystkich punktów. Błąd średni kwadratowy $RMSE_z$ dla całego obszaru wyniósł $RMSE_z = 0.35$ [m], po uwzględnieniu czynnika systematycznego błąd średni otrzymał wartość $RMSE_z = 0.30$ [m].

Histogram odchyłek v_z (ryc. 6) wskazuje na występowanie błędu systematycznego w dwóch miejscach, w dodatniej i ujemnej części wykresu.



Ryc. 6. Histogram odchyłek v_z dla całego obszaru

W dalszej części analizy wyodrębniono obszary, gdzie przeprowadzono oddzielną analizę dokładnościową, poniżej przedstawiono histogram odchyłek v_z dla obydwu obszarów (ryc. 7).



Ryc. 7. Histogram odchyłek v_z na zdefiniowanych obszarach

W końcowym etapie analizy obliczono błąd średni $RMSE_z$ dla całego obszaru wykorzystując zredukowane o błędy systematyczne wyniki uzyskane z osobnych analiz dokładnościowych wydzielonych obszarów. Ostatecznie otrzymano wartość błędu średniego $RMSE_z = 0.25$ [m].

4. Zakończenie

Przeprowadzona w pracy analiza dokładnościowa danych lidarowych potwierdziła ich dużą dokładność wysokościową (25 cm). Uzyskane wyniki mieszczą się w przedziałach podawanych przez instytucje naukowe oraz firmy komercyjne. Otrzymanie jeszcze lepszych dokładności dla wysokości jest oczywiście możliwe ($RMSE_z$ w przedziale 5 – 15 cm), jednak w praktyce dąży się do osiągnięcia kompromisu pomiędzy wymaganiami dokładnościowymi, a kosztami ich uzyskania, dlatego częściej

wykonywane są pomiary lidarowe w których uzyskuje się błędy średnie RMSE_z należące do przedziału 15 – 50 cm (Mercer, 2001).

1. Andersen H.E. 2002. *The use of airborne laser scanner data (LIDAR) for forest measurement applications*. WFCA. Washington.
2. Axelsson P. 2000. *DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models*. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXIII/4B*, Amsterdam.
3. Brovelli M. A., Cannata M., Longoni U. M. 2002. *Managing and processing LIDAR data within GRASS*. *Proceedings of the Open source GIS – GRASS user conference, Trento*.
4. Bucior M., Borowiec N., Jędrychowski I., Pyka K. 2006. *Wykrywanie budynków na podstawie lotniczego skanowania laserowego*. *Roczniki Geomatyki 2006, tom IV, zeszyt 3*, Warszawa.
5. Elmqvist M. 2002. *Ground surface estimation from airborne laser scanner data using active shape models*. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXIV/3A*. Graz.
6. Hyypä J., Pyssalo U., Hyypä H., Samberg A. 2002. *Elevation accuracy of laser scanning – derived digital terrain and target models in forest environment*. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXIV / 3A*, Graz.
7. Kadaj R. 2000. *Rady na układy*. *Geodeta 9/2000*, Warszawa.
8. Kadaj R. 2000. *Elipsojdy a układy*. *Geodeta 9/2000*, Warszawa.
9. Kraus K., Pfeifer N. 1998. *Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. USA.
10. Kurczyński Z. 1999. *DTM inaczej*. *Geodeta 2/1999*, Warszawa.
11. Kurczyński Z. 2006. *Lotniczy Skanowanie laserowy lidar*. <http://www.geoforum.pl/>.
12. Kurczyński Z., Preuss R. 2003. *Podstawy fotogrametrii*. OWPW, Warszawa.
13. Manue D. F. Editor. 2001. *Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual*. ASPRS, Maryland.
14. Marmol U. 2003. *Pozyskiwanie numerycznego modelu powierzchni topograficznej (NMPT) w oparciu o dane wysokościowe pochodzące z lotniczego skanera laserowego*. AGH, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji. Wrocław – Polanica Zdrój.
15. Marmol U., Mikrut S., Będkowski K. 2006. *Generowanie NMT i NMPT obszarów z pokrywą roślinną na podstawie danych lidarowych*. *Materiały konferencyjne*. UWM. Olsztyn.
16. Mercer B. 2001. *Comparing LIDAR and IFSAR: What can you expect?* *Photogrammetric Week*, Stuttgart.
17. Pfeifer N., Stadler P., Briese Ch. 2001. *Derivation of digital terrain models in SCOP++ environment*. *OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Digital Elevation Models*, Sztokholm.
18. Roggero M. 2002. *Object segmentation with region growing and principal component analysis*. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXIV / 3A*, Graz.
19. Tarek Z. 2002. *Skanowanie terenu laserem lotniczym*. *Geodeta 12/2002*, Warszawa.
20. Vosselman G., Maas H-G. 2001. *Adjustment and filtering of raw laser altimetry data*. *OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models*, Sztokholm.
21. Wack R., Wimmer A. 2002. *Digital terrain models from airborne laser scanner data – a grid based approach*. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXIV / 3B*, Graz.
22. Wytyczne techniczne G-1.10. 2001. *Formuły odwzorowawcze i parametry układów współrzędnych*. GUGIK, Warszawa.
23. Wywiad GEODETY 2007. *Wrocław to dachy!*. *Geodeta 1/2007*, Warszawa.
24. 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*. 1(8).

Recenzował: dr hab. inż. Krzysztof Gawroński