

Ireneusz Borowiecki, Marek Ślusarski

LOTNICZY SKANING LASEROWY LIDAR MIASTA KRAKOWA (OCENA DOKŁADNOŚCIOWA)

AERIAL LASER SCANNING LIDAR OF THE AREA OF KRAKOW (PRECISION ANALYSIS)

Streszczenie

Artykuł przedstawia charakterystykę technologii lotniczego skaningu laserowego LIDAR, architekturę systemu, jej wady i zalety oraz ocenę dokładności.

Analizę dokładnościową lotniczego skaningu laserowego wykonano na podstawie danych pomiaru lidarowego miasta Krakowa z 2006 roku (ocena dokładności współrzędnych X, Y, Z na obiekcie: Uniwersytet Rolniczy ul. Balicka oraz Wzgórze Wawelskie). W procesie analizy dokładnościowej zaproponowano obliczenie średniego błędu kwadratowego położenia $RMSE_X$, $RMSE_Y$, $RMSE_{XY}$, średniego błędu kwadratowego wysokości $RMSE_Z$, dokładności wysokościowej D_Z oraz obliczenie częstości odchyłek dx, dy i dz wyrażonej w procentach.

Słowa kluczowe: lotniczy skaningu laserowy, system LIDAR, numeryczny model terenu (DTM)

Summary

In the article a technology of the aerial laser scanning (LIDAR) was characterized as well as the system architecture its drawbacks and advantages and a precision analysis.

The precision analysis of the aerial laser scanning was carried out on the basis of the lidar measurements of Krakow data collected in 2006. For the precision test of the X, Y, Z coordinates two objects were used: the University of Agriculture (Balicka street in Krakow) and the Wawel Hill.

In the process of the precision analysis calculations of the mean square errors of the position $RMSE_X$, $RMSE_Y$, $RMSE_{XY}$, mean square error of the height $RMSE_Z$ and the height precision D_Z were proposed as well as calculation of the percentage of the deviation frequency.

Key words: aerial laser scanning, System Light Detection and Ranging, Digital Terrain Model

WSTĘP

Liczne zastosowania szerokiego spektrum informacji (charakteryzujących powierzchnię geograficzną) w różnych dziedzinach gospodarki np.: górnictwie, budownictwie, ochronie środowiska, komunikacji, łączności, ekologii, rolnictwie, hydrografii i wielu innych, decydują o nieustannym rozwoju metod szybkiego i efektywnego ich pozyskiwania.

Nowoczesne technologie informatyczne pozwoliły na przesyłanie, gromadzenie oraz przetwarzanie dużych zbiorów danych, natomiast systemy satelitarne i laserowe dokonały technologicznego przełomu w kwestii pozyskiwania informacji.

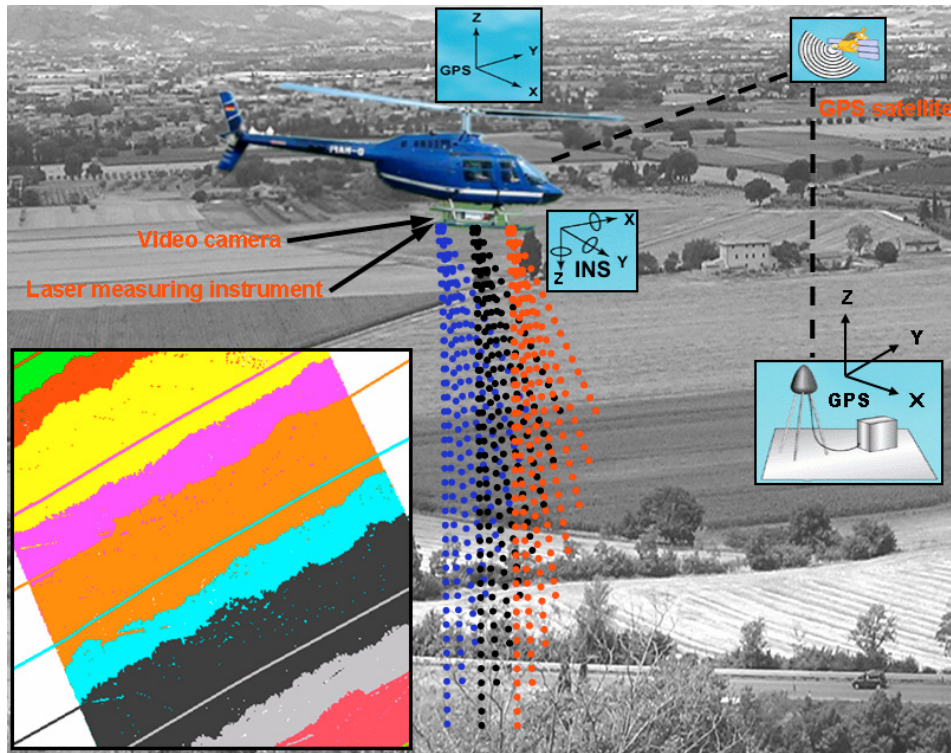
W procesie pozyskiwania danych źródłowych dla opracowania numerycznego modelu terenu (zwłaszcza w przypadku dużych obszarów) coraz częściej stosuje się wspólnie z innymi metodami (np.: metodą fotogrametryczną) technologię lotniczego skaningu laserowego LIDAR, przykładowo zrealizowano pomiar lidowarowy miasta Wrocławia i Krakowa [Wywiad GEODETY 2007], [Bucior i in. 2006].

W artykule oprócz charakterystyki lotniczego skaningu laserowego LIDAR, przedstawiono propozycję oceny dokładnościowej polegającej na: porównaniu punktów pomiaru lidarowego z niwelacją techniczną dla 25 punktów stanowiących narożniki obiektów budowlanych (obiekt Uniwersytet Rolniczy przy ul. Balickiej), porównaniu punktów pomiaru lidarowego z fotogrametrycznym dla 235 losowo wybranych punktów będących załamaniem i narożnikami dachów (obiekt Zamek Królewski na Wawelu), obliczeniu błędów średnich kwadratowych ($RMSE_x$, $RMSE_y$, $RMSE_{xy}$, $RMSE_z$), obliczeniu dokładności wysokościowej D_z , oraz opracowaniu histogramów odchyłek dx , dy i dz (wykresy częstości odchyłek wyrażonej w procentach).

Wykorzystano dane z lotniczego skaningu laserowego miasta Krakowa (pomiar wykonany w 2006 roku), które uzyskano w Urzędzie Miasta Krakowa, Biurze Planowania Przestrzennego.

TECHNOLOGIA LOTNICZEGO SKANINGU LASEROWEGO LIDAR

Lotniczy skaningu laserowy LIDAR (*Light Detection and Ranging*), nazywany także ALS (*Airborne Laser Scanning*) sprowadza się do pomiaru odległości z lecącego statku powietrznego (helikoptera lub samolotu) do punktów powierzchni ziemi. Skaner laserowy z bardzo dużą częstotliwością skanuje teren ruchem wahadłowym w kierunku prostopadłym do kierunku lotu, oraz we wzajemnie zachodzących na siebie, równoległych pasach o pokryciu około 30% (rys. 1), dzięki czemu usuwa się występujące w trakcie pomiaru błędy systematyczne (na etapie postprocessingu).



Rysunek 1. System lotniczego skaningu laserowego LIDAR
Figure 1. Aerial laser scanning system LIDAR

System LIDAR zbudowany jest z zainstalowanego na urządzeniu latającym: dalmierza laserowego, odbiornika do rejestracji danych, inercyjnego systemu nawigacyjnego (INS), systemu pozycjonowania trajektorii lotu (GPS), kamery video, systemu planowania i zarządzania lotem, oraz naziemnych stacji referencyjnych GPS i stacji do obróbki danych (rys. 1).

Wśród wymienionych powyżej kluczowy element systemu LIDAR stanowi dalmierz laserowy emitujący w odpowiedniej częstotliwości promieniowanie elektromagnetyczne (w zakresie bliskiej podczerwieni). Promień lasera przechodzący przez skanujący układ optyczny zostaje odbity od powierzchni ziemi, po powrocie rejestruje go optyczny układ odbiorczy, przy czym obliczenie odległości odbywa się na podstawie pomiaru różnicy czasu pomiędzy wysłaniem, a odbiorem odbitego sygnału laserowego. W celu zapewnienia odpowiedniej dokładności pomiaru, ze skanerem laserowym współpracuje system GPS obliczający współrzędne XYZ trajektorii lotu przy wykorzystaniu odbiornika umieszczonego w statku powietrznym oraz naziemnych stacji referencyjnych (wykonuje się tzw. pomiar różnicowy DGPS). Zastosowanie cyfrowej kamery

video, kamery fotogrametrycznej lub skanera CCD pozwala na rejestrację obrazu skanowanego terenu, co z kolei umożliwia późniejszą filtrację danych oraz interpretację wyników, czy także opracowanie ortofotomapy [Kurczyński 1999].

Przetworzenie danych z systemu pomiaru odległości, GPS i INS pozwala na obliczenie współrzędnych X, Y, Z „chmury punktów”, przy czym stopień gęstości punktów jest wystarczający dla uzyskania trójwymiarowej przestrzeni reprezentującej powierzchnię terenu i jego pokrycie.

Dla wyliczenia i wyeliminowania błędów systematycznych stosuje się poprawki do współrzędnych X, Y, Z. W tym celu wykorzystuje się punkty kontrolne o przynajmniej trzykrotnie dokładniejszych współrzędnych przestrzennych np.: płaszczyzna referencyjna w postaci boiska sportowego lub dużego parkingu [Tarek 2002].

Do ważniejszych zalet lotniczego skaningu laserowego LIDAR, które wyróżniają go wśród innych technologii pomiarowych można między innymi zaliczyć: niezależność od warunków pogodowych (podstawa chmur wyższa od wysokości lotu, przy czym negatywny wpływ wywierają jedynie ulewne deszcze i mgła), niezależność od warunków oświetleniowych (skanowanie w nocy), przenikanie przez warstwę roślinności, duża gęstość punktów przestrzennych, wysoka dokładność wyznaczenia współrzędnej Z, oraz krótki czas otrzymania produktu końcowego i relatywnie niskie koszty stosowania technologii lidarów dla dużych obszarów.

Do istotniejszych wad między innymi zaliczamy wnikanie impulsu lasera w powierzchnię wody, trudności w określeniu linii szkieletowych i linii nieciągłości terenu oraz dużą ilość danych do przetworzenia podczas postprocessingu danych lidarowych.

PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ SKANINGU LASEROWEGO LIDAR

Technologia lotniczego skaningu laserowego dzięki wielu unikalnym zaletom znajduje liczne zastosowania, wśród których wyróżniamy [Manue i in. 2001; Kurczyński, Preuss 2003]:

- inwentaryzacja i konserwacja, projektowanie przebiegu linii energetycznych, dróg, torów, rurociągów, wałów przeciwpowodziowych i innych wydłużonych obiektów infrastruktury,
- budowa przestrzennego modelu DSM aglomeracji miejskich 3D i DTM,
- obrazowanie obszarów kopalń odkrywkowych, wyznaczanie pojemności zbiorników,
- badanie zasięgu źródeł zanieczyszczeń,
- w planowaniu przestrzennym,
- 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.),

- pomiary terenów podmokłych,
- ocena zniszczeń po kataklizmach (huragany, trzęsienia ziemi, powo-
dzie),
- monitoring przemieszczeń lodowców (pomiar powierzchni zaśnieżonych
i pokrytych lodem).

ANALIZA DOKŁADNOŚCI POMIARU LIDAROWEGO KRAKOWA

O dokładności lotniczego skaningu laserowego LIDAR decyduje wiele czynników, do których między innymi zaliczamy:

- błąd pomiaru odległości, który zależy od dokładności pomiaru czasu przejścia impulsu, fazy sygnału pomiarowego, rodzaju powierzchni, nachylenia terenu, wysokości lotu, przy czym dokładność pomiaru odległości przede wszystkim determinuje dokładność wysokości [Kraus, Pfeifer 1998],
- dokładności wysokościowe współrzędnej Z osiągnięte przy zastosowaniu lotniczego skaningu laserowego są znacznie wyższe od dokładności położenia (współrzędnej X i Y), co jest między innymi spowodowane błędami losowymi oraz niewyrównanym dryfem inercyjnego systemu nawigacyjnego INS (występują błędy skręcenia kątów),
- błędy wynikające z niewłaściwej współpracy poszczególnych komponentów systemu LIDAR,
- błędy na etapie postprocessingu (przetwarzanie i transformacja danych) [Maas 2003].

W celu opracowania oceny dokładności zaproponowano obliczenie średniego błędu kwadratowego (Root Mean Square Error) wysokości $RMSE_z$:

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

gdzie:

- z_1 – wysokość mierzona (metoda lotniczego skaningu laserowego LIDAR),
 - z_2 – wysokość referencyjna (niwelacja techniczna dla obiektu UR i metoda fotogrametryczna dla obiektu Zamek Królewski),
 - n – ilość porównywanych punktów,
- oraz dokładność wysokościową CE95 (circular error) zgodnie ze standardami NSSDA, według skróconego wzoru [Manue i inni 2001]:

$$D_z = 1,9600 * RMSE_z$$

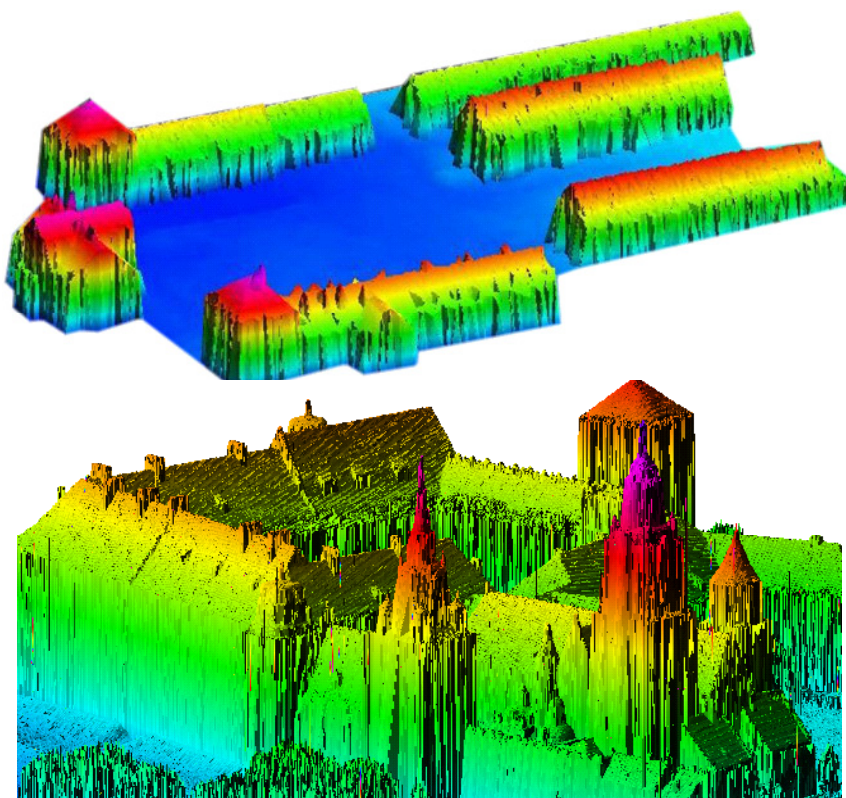
Analogiczne wzory można także zastosować w celu obliczenia: $RMSE_x$ i $RMSE_y$, oraz dodatkowo wyliczyć sumaryczny błąd średni kwadratowy położenia $RMSE_{xy}$.

Przyjmuje się dokładność lotniczego skaningu laserowego LIDAR przedstawioną w postaci błędu średniego kwadratowego ≈ 15 cm (przy pułapie lotu statku powietrznego do 1200 m) oraz ≈ 25 cm dla wysokości lotu powyżej 1200 m.

Biuro Planowania Przestrzennego Urzędu Miasta Krakowa zleciło wykonanie lotniczego skaningu laserowego miasta Krakowa oraz obliczenie współrzędnych X, Y, Z otrzymanych w wyniku nalotu punktów lidarowych [Jędrychowski 2007].

Skaning laserowy przeprowadzono w roku 2006 na obszarze 400 km² i średniej gęstości punktów 12 punktów na m². Statek powietrzny stanowił śmigłowiec z systemem LIDAR FLI-MAP 400, średnia wysokość trajektorii lotu 350 m, dodatkowo wykonano 13 000 zdjęć za pomocą kamery cyfrowej.

Ocenę dokładności powyższego pomiaru wykonano na dwóch obiektach: budynku Uniwersytetu Rolniczego przy ul. Balickiej oraz Zamek Królewski na Wzgórzu Wawelskim (rys. 2).



Rysunek 2. Obiekt Uniwersytet Rolniczy ul. Balicka i Zamek Królewski
Figure 2. Building of the University of Agriculture on Balicka street in Krakow and the Royal Castle on the Wawel Hill

Dla obiektu UR wybrano 25 punktów lidarowych i porównano je z punktami referencyjnymi o wyższej dokładności pomierzonymi niwelacją techniczną (położenie zostało określone pomiarem sytuacyjnym), natomiast na obiekcie Zamek Królewski wybrano 235 punktów i porównano je z punktami referencyjnymi otrzymanymi metodą fotogrametryczną (fotogrametryczny pomiar dachów budynków centrum Krakowa z 2004 roku – stereodigitalizacja ze zdjęć lotniczych w skali 1:13 000).

W procesie analizy dokładnościowej współrzędnych X, Y i Z lotniczego skaningu laserowego miasta Krakowa wyróżniono następujące etapy:

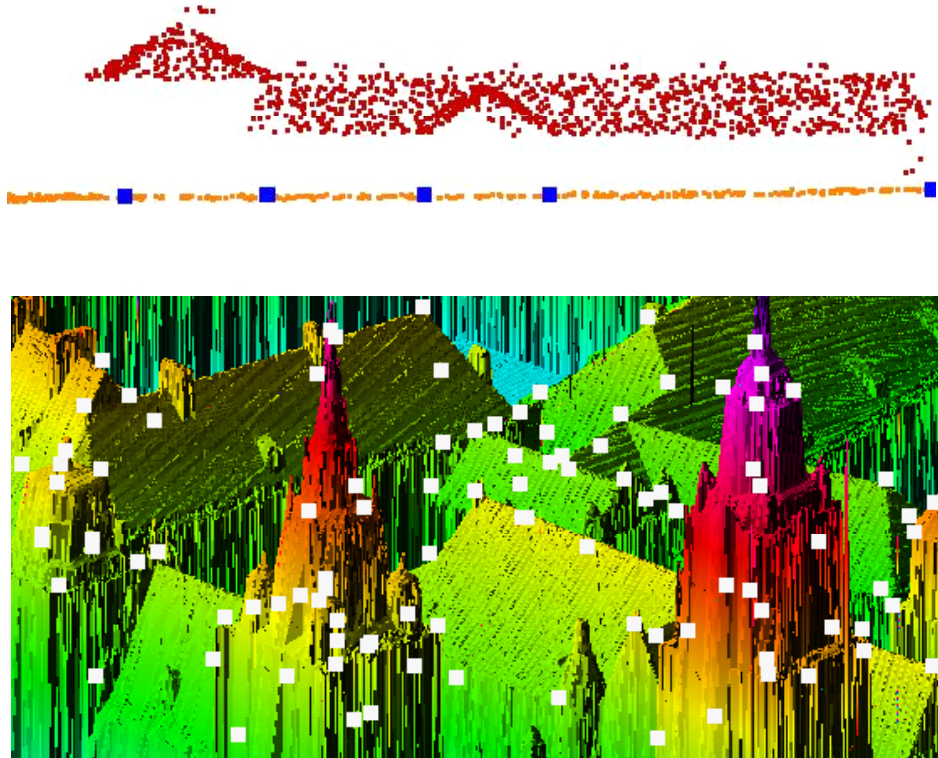
- opracowanie modelu 3D obiektów przy wykorzystaniu „chmury punktów” pomiaru lidarowego,
- osadzenie na modelu 3D wybranych punktów,
- obliczenie średniego błędu kwadratowego położenia ($RMSE_X$, $RMSE_Y$, $RMSE_{XY}$ – tylko dla obiektu Zamek Królewski) wysokości $RMSE_Z$, oraz dokładności wysokościowej D_Z ,
- wykonanie ponownego obliczenia błędów średnich po uwzględnieniu występującego błędu systematycznego,
- przedstawienie oceny dokładnościowej w postaci histogramów odchyłek dx , dy , dz (wykresy częstości odchyłek wyrażonej w procentach).

Do opracowania modelu 3D oraz osadzenia punktów na modelu zastosowano oprogramowanie firmy TerraSolid, w aplikacji nakładkowej TerraScan grupę narzędzi View Laser (obiekt UR) i narzędzie *Mouse Point Adjustment* (obiekt Zamek Królewski), natomiast w aplikacji TerraModeler narzędzia: *Display Shaded Surface*, *Display Contours*, *Display Triangles*.

Niestety brak dostatecznej ilości punktów lidarowych u podstaw budynków uniemożliwił przeprowadzenie oceny dokładnościowej dla współrzędnej X i Y (obiekt UR). Narzędzia grupy View Laser między innymi pokazują przekroje przez chmurę punktów, co pozwoliło na manualne wyinterpolowanie współrzędnej Z (współrzędna X i Y pochodziła z pomiaru sytuacyjnego) (rys. 3 góra).

Natomiast funkcja *Mouse Point Adjustment* umieszcza elementy w określonym położeniu lub na odpowiedniej wysokości punktów laserowych (rys. 3 dół). Wybranie opcji *Point / Closest* osadza punkty w miejscu najwyżej położonym na modelu, w ustawionym wcześniej promieniu poszukiwań (*Within*) (obiekt Zamek Królewski).

Obliczenie odchyłek dx , dy , dz wykazało występowanie błędu systematycznego, który został wyeliminowany poprzez odjęcie średniej odchyłki. W tabeli 1 zestawiono obliczone błędy średnie oraz dokładność wysokościową D_Z przed i po korekcie błędu systematycznego.

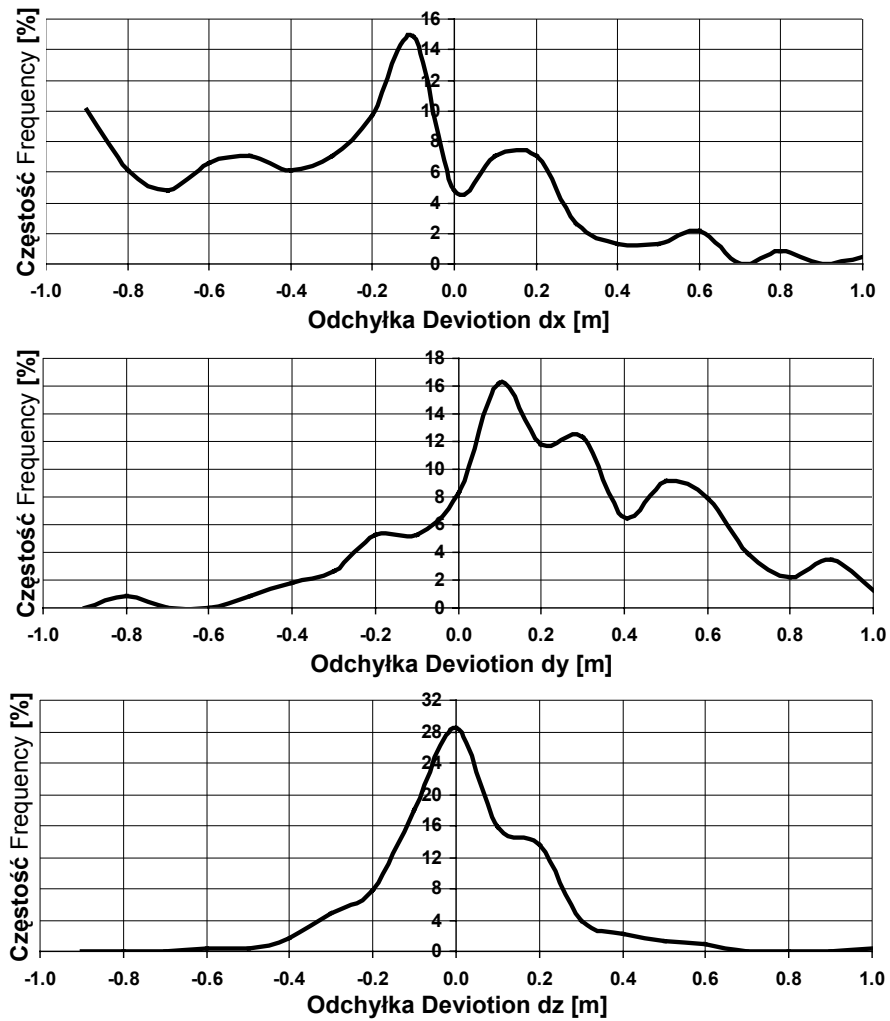


Rysunek 3. Osadzanie punktów
Figure 3. Points setting

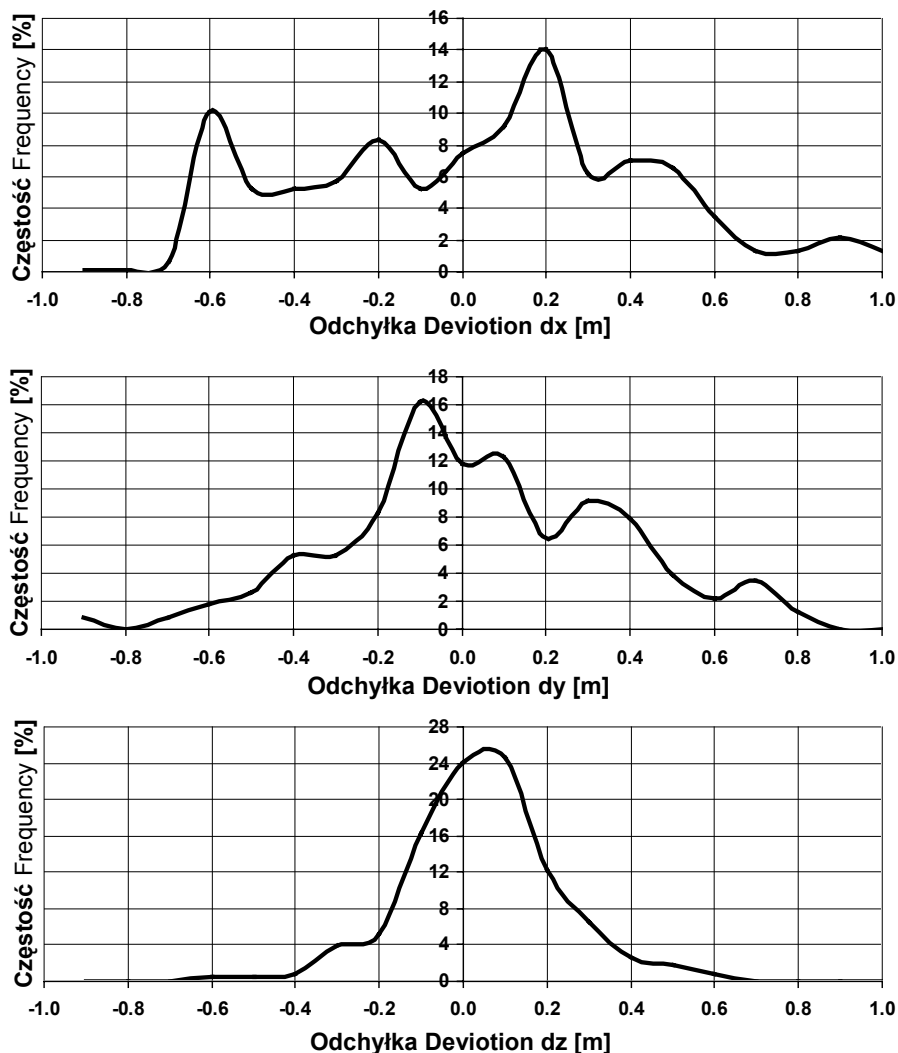
Tabela 1. Ocena dokładnościowa pomiaru lidarowego
Table 1. Precision analysis of the LIDAR measurements

	Przed korektą błędu systematycznego [cm] Before correction of the systematic error [cm]		Po korekcie błędu systematycznego [cm] After correction of the systematic error [cm]	
	Obiekt UR Object UR	Zamek Królewski Royal Castle	Obiekt UR Object UR	Zamek Królewski Royal Castle
RMSE _x	—	52	—	44
RMSE _y	—	41	—	35
RMSE _{xy}	—	66	—	56
RMSE _z	18	20	17	19
D _z	35	39	33	37

Na rysunku 4 przedstawiono histogramy odchyłek dx, dy, dz przed korektą błędu systematycznego, natomiast rysunek 5 ilustruje histogramy odchyłek dx, dy, dz po korekcie błędu systematycznego (obiekt Zamek Królewski).



Rysunek 4. Histogramy odchyłek dx, dy, dz przed korekcją błędu systematycznego
Figure 4. Histograms of deviations dx, dy, dz before correction of the systematic error



Rysunek 5. Histogramy odchyłek dx, dy, dz po korekcie błędu systematycznego
Figure 5. Histograms of deviations dx, dy, dz after correction of the systematic error

PODSUMOWANIE

Lotniczy skaning laserowy pozwala na otrzymanie punktów o wysokiej dokładności wyznaczenia współrzędnej wysokościowej Z oraz zdecydowanie mniejszych dokładności współrzędnych sytuacyjnych X i Y. Analiza dokładnościowa lotniczego skaningu laserowego miasta Krakowa (przeprowadzonego w roku 2006) potwierdziła dużą dokładność wyznaczenia współrzędnej Z (po

korekcie błędu systematycznego średni błąd kwadratowy wyniósł $RMSE_Z = 17$ cm dla obiektu Uniwersytet Rolniczy i $RMSE_Z = 19$ cm dla obiektu Zamek Królewski) oraz mieszcząca się w dopuszczalnych granicach dokładność wyznaczenia współrzędnej X i Y (po korekcie błędu systematycznego średni błąd kwadratowy dla obiektu Zamek Królewski wynosił $RMSE_{XY} = 56$ cm, natomiast nie obliczono $RMSE_{XY}$ dla obiektu Uniwersytet Rolniczy, ze względu na niewystarczającą ilość punktów lidarowych).

Lotniczy skaning laserowy pozwala na uzyskanie wysokich dokładności wysokościowych punktów (przedział 5–15 cm), co jest jednak ściśle związane z kosztami ich pozyskania.

W rzeczywistości zadowalającym przedziałem dokładności dla wysokości jest zakres 15–50 cm, a dla dokładności współrzędnej X i Y 50–100 cm [Mercer 2001].

BIBLIOGRAFIA

- Bucior M., Borowiec N., Jędrychowski I., Pyka K. *Wykrywanie budynków na podstawie lotniczego skanowania laserowego*. Roczniki Geomatyki 2006, t. IV, z. 3, Warszawa 2006.
- Jędrychowski I. *Lotnicze skanowanie laserowe w Polsce*. Polski Przegląd Kartograficzny, PPWK, t. 39, nr. 2, Warszawa 2007.
- Kraus K., Pfeifer N. *Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, USA 1998.
- Kurczyński Z. *DTM inaczej*. Geodeta 2/1999, Warszawa 1999.
- Kurczyński Z., Preuss R. *Podstawy fotogrametrii*. OWPW, Warszawa 2003.
- Maas H-G. *Planimetric and height accuracy of airborne laserscanner data: User requirements and system performance*. Dresden 2003.
- Manue D. F. Editor. *Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual*. ASPRS, Maryland 2001.
- Mercer B. *Comparing LIDAR and IFSAR: What can you expect?* Photogrammetric Week, Stuttgart 2001.
- Tarek Z. *Skanowanie terenu laserem lotniczym*. Geodeta 12/2002, Warszawa 2002.
- Wywiad GEODETY. Wrocław to dachy!. Geodeta 1/2007, Warszawa 2007.

Dr inż. Ireneusz Borowiecki
Dr inż. Marek Ślusarski
Katedra Geodezji
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
30-149 Kraków, ul. Balicka 253A
email: iborowiecki@ar.krakow.pl
email: rmslusar@cyf-kr.edu.pl

Recenzent: Prof. dr hab. Aleksander Żarnowski