

## ZASTOSOWANIE LOTNICZEGO SKANINGU LASEROWEGO DLA CELÓW OPRACOWANIA NMT (OCENA DOKŁADNOŚCI POMIARÓW LIDAROWYCH)

© Borowiecki I., 2009

*В статье представлен анализ точности авиационного лазерного сканирования города  
Кракова, проведённого в 2006 году.*

*В процессе оценки точности этого проекта предложено вычислить средние  
квадратические ошибки планового положения по осям  $x, y$  и расстояния ( $xy$ ), а также  
вчисление статистических параметров (отклонений в процентах). Применено сравнение  
лазерных и фотограмметрических данных для 235 наземных пунктов.*

*This article discusses the precision analysis of the laser scanning of the city of Krakow performed  
in 2006.*

*In the process of the precision analysis of the lidar measurements of Kraków calculations of the mean  
square errors of the position  $RMSE_x$   $RMSE_y$   $RMSE_{xy}$ , mean square error of the height  $RMSE_z$  as well  
as calculation of the percentage of deviation (lidar and photogrametric data were compared for 235  
exemplary points) were proposed.*

### 1. Wprowadzenie

Rozwój metod pozyskiwania i przetwarzania informacji przestrzennej oraz doskonalenie technologii informatycznych przyczynia się do upowszechnienia i większej dostępności systemów danych z informacjami o powierzchni geograficznej.

Lotniczy skaniny laserowy stanowi nowoczesną technologię wykorzystywaną dla celów pozyskiwania informacji w procesie tworzenia numerycznego modelu terenu (NMT) np.: pomiar lidarowy miasta Wrocławia i Krakowa (Wywiad GEODETY, 2007), (Bucior i inni, 2006).

Przetwarzanie numerycznego modelu terenu umożliwia między innymi wyznaczenie współrzędnych X, Y, H punktu, uzyskanie informacji o powierzchni terenu w postaci warstw, przekrojów i kierunków spadków, określenie objętości mas ziemnych, przedstawienie powierzchni geograficznej w postaci modeli 3D, co znajduje zastosowanie w różnych dziedzinach np.: komunikacji, górnictwie, łączności, ekologii, rolnictwie, hydrografii, ochronie środowiska, urbanistyce i wielu innych.

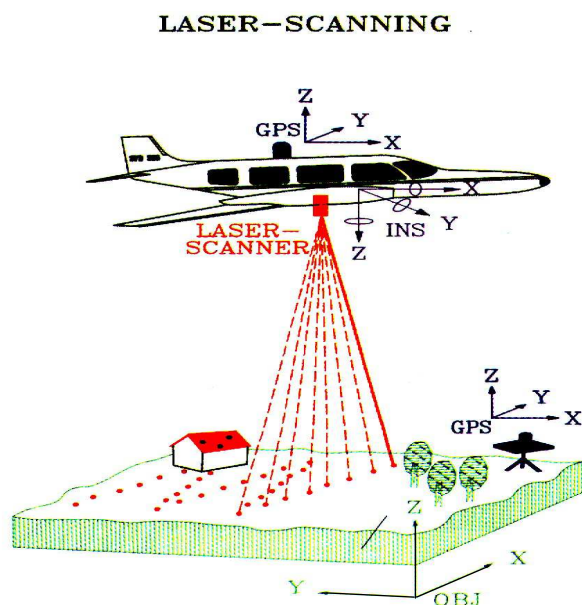
W artykule zaproponowano metodę oceny dokładności lotniczego skaniny laserowego polegającą na porównaniu punktów przestrzennych pomiaru lidarowego z fotogrametrycznym dla 235 przykładowo wybranych punktów.

Dane niezbędne do przeprowadzenia badań (informacje z lotniczego skaniny laserowego miasta Krakowa przeprowadzonego w 2006 roku) uzyskano w Urzędzie Miasta Krakowa, Biurze Planowania Przestrzennego.

### 2. Lotniczy skaniny laserowy LIDAR

Technologia lotniczego skaniny laserowego LIDAR (Light Detection and Ranging), przedstawiana również jako ALS (Airborne Laser Scanning) polega na pomiarze odległości z lecącego samolotu lub helikoptera do punktów powierzchni terenu (określana jest różnica czasu pomiędzy wysłaniem, a odbiorem pojedynczego impulsu lasera). Skaner laserowy z dużą częstotliwością skanuje teren ruchem wahadłowym, prostopadle do kierunku lotu (ryc. 1), przy czym skanowanie przeprowadza się w równoległych, wzajemnie zachodzących na siebie pasach (pokrycie około 30%).

System 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.



Ryc 1. System lotniczego skaningu laserowego LIDAR (Andersen, 2002).

Integracja oraz wzajemna współpraca systemu pomiaru odległości, GPS i INS pozwala na otrzymanie wystarczająco zagęszczonej „chmury punktów” (punkty przestrzenne o znanych współrzędnych X, Y, Z) dla uzyskania trójwymiarowej przestrzeni reprezentującej powierzchnię terenu i jego pokrycie. Zastosowanie kamery wideo rejestrującej skanowany obszar, umożliwia podczas postprocessingu danych lidarowych uprościć proces filtracji „chmury punktów”.

W celu usunięcia błędów systematycznych zaleca się zastosowanie poprawek do współrzędnych X, Y, Z, obliczonych przy wykorzystaniu punktów kontrolnych o przynajmniej trzykrotnie dokładniejszych współrzędnych przestrzennych np.: płaszczyzna referencyjna w postaci boiska sportowego (Tarek, 2002).

Lotniczy skaningu laserowy LIDAR posiada wiele zalet wyróżniających go wśród innych technologii pomiarowych:

- 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,
- wystarczająca dokładność wyznaczenia współrzędnych X i Y, oraz wysoka dokładność wyznaczenia współrzędnej Z,
- krótki czas otrzymania produktu końcowego,
- relatywnie niskie koszty (zwłaszcza dla dużych obszarów).

Niestety technologia skaningu laserowego posiada również wady, do których między innymi zaliczamy:

- wnikanie impulsu lasera w powierzchnię wody,
- trudności w określeniu linii szkieletowych i linii nieciągłości terenu,
- duża ilość danych do przetworzenia podczas postprocessingu danych lidarowych.

### 3. Dokładność lotniczego skaningu laserowego

Na dokładność lotniczego skaningu laserowego wpływa wiele różnych czynników:

– 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 wysokościowej współrzędnej Z osiągniętej przy zastosowaniu lotniczego skaningu laserowego są znacznie wyższe od dokładności położenia (współrzędnej X i Y), co jest między innymi spowodowane błędami losowymi oraz niewyrównanym dryftem 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).

Dokładność wysokościowa NMT otrzymanego przy wykorzystaniu lotniczego skaningu laserowego, wyrażona w postaci błędu średniego wynosi od 15 cm (pułap lotu do 1200 m) do 25 cm (pułap lotu powyżej 1200 m).

$$m_{Z,NMT} = 0,15 - 0,25 \text{ m}$$

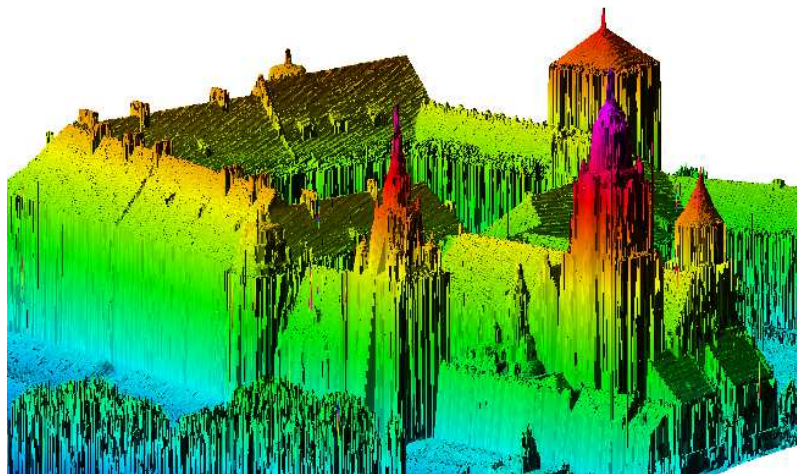
gdzie:

$m_{Z,NMT}$  – błąd średni wysokości Z.

Badania przeprowadzone w Sztokholmie przez Królewski Instytut Techniczny wykazały błąd średni wysokości około 0.09 m, natomiast podczas badań dokładności położenia błąd średni położenia wyniósł 0.65 m przy wysokości lotu 500 m (Maas, 2000), 0.49 m dla wysokości lotu 500 m (Vosselman, Maas, 2001), oraz 0.70 m przy wysokości lotu 700 m.

#### 4. Ocena dokładnościowa nalotu lidarowego miasta Krakowa

Na zlecenie Biura Planowania Przestrzennego Urzędu Miasta Krakowa przeprowadzono dwa naloty w roku 2004 i 2006 (ryc. 2) (Jędrychowski, 2007).



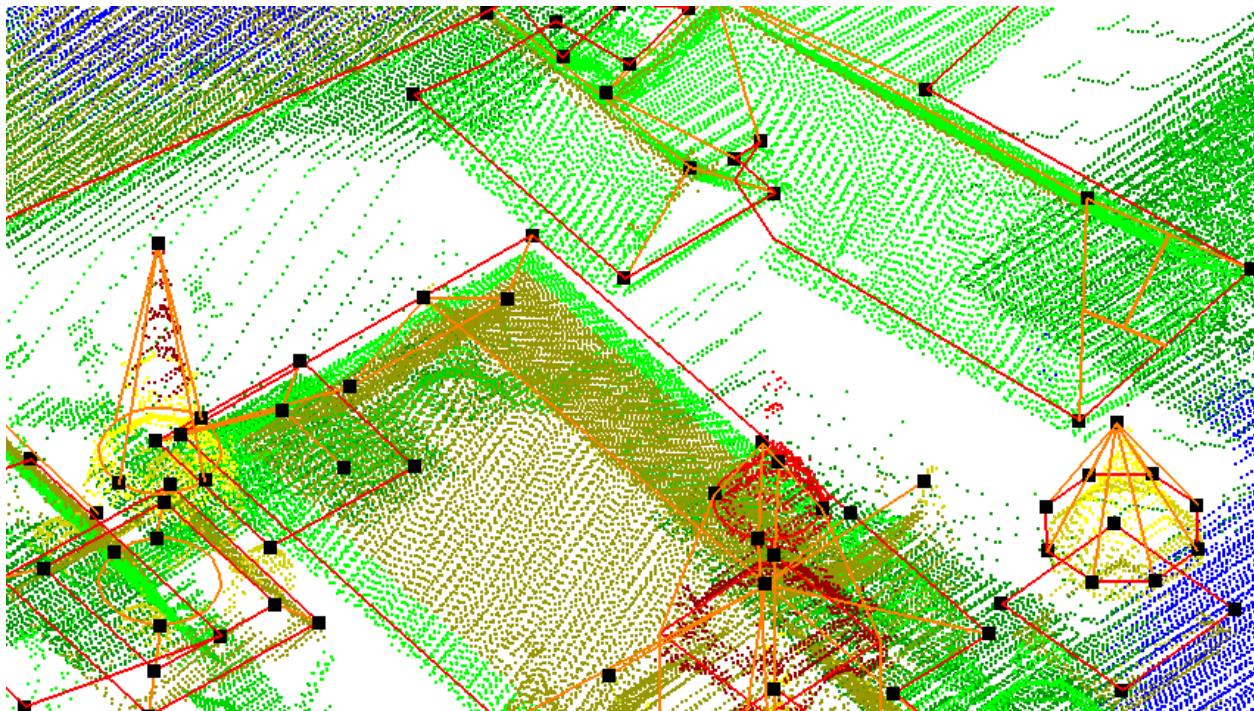
Ryc. 2. Lotniczy skaningu laserowego miasta Krakowa w 2006 roku

Pierwszy nalot zrealizowano za pomocą skanera TopEye Mk II, częstotliwość impulsu lasera 50 kHz, średnia wysokość trajektorii lotu 300 m, prędkość lotu około 45 km/h, kąt skanowania 14–20°, plan nalotu 9 pasów o szerokości 200 m (część wspólna między pasami około 50 m), średnia gęstość pomiaru około 1.5 punkta/m<sup>2</sup> (powierzchnia 2 km<sup>2</sup>, zarejestrowano 3.7 miliona punktów), format danych dane binarne, układ odniesienia UTM strefa 33N 15E, wysokość elipsoidalna, ETRF'89.

W 2006 roku przeprowadzono ponowny nalot na znacznie większym obszarze (powierzchnia 400 km<sup>2</sup>) oraz o wyższej średniej gęstości punktów (osiągnięto 12 punktów/m<sup>2</sup>), zastosowano śmigłowiec z systemem FLI-MAP 400, średnia wysokość trajektorii lotu 350 m, dodatkowo wykonano 13 000 zdjęć za pomocą kamery cyfrowej.

Ocenie dokładnościowej poddano lotniczy skaningu laserowego przeprowadzony w 2006 roku, zastosowano porównanie 235 przykładowo wybranych punktów (otrzymanych metodą skaningu laserowego) z odpowiadającymi im punktami pomiaru fotogrametrycznego (ryc. 3).

Punkty referencyjne uzyskano dzięki fotogrametrycznemu pomiarowi dachów budynków centrum Krakowa przeprowadzonemu w 2004 roku (stereodigitalizacja ze zdjęć lotniczych w skali 1:13000).



Ryc. 3. „Chmura punktów” pomiaru lidarowego i punkty pomiaru fotogrametrycznego

Obliczono średni błąd kwadratowy (Root Mean Square Error) wysokości  $RMSE_z$ :

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

gdzie:

- $z_1$  - wysokość mierzona (metoda lotniczego skaningu laserowego LIDAR),
- $z_2$  - wysokość referencyjna (metoda fotogrametryczna),
- $n$  – ilość porównywanych punktów.

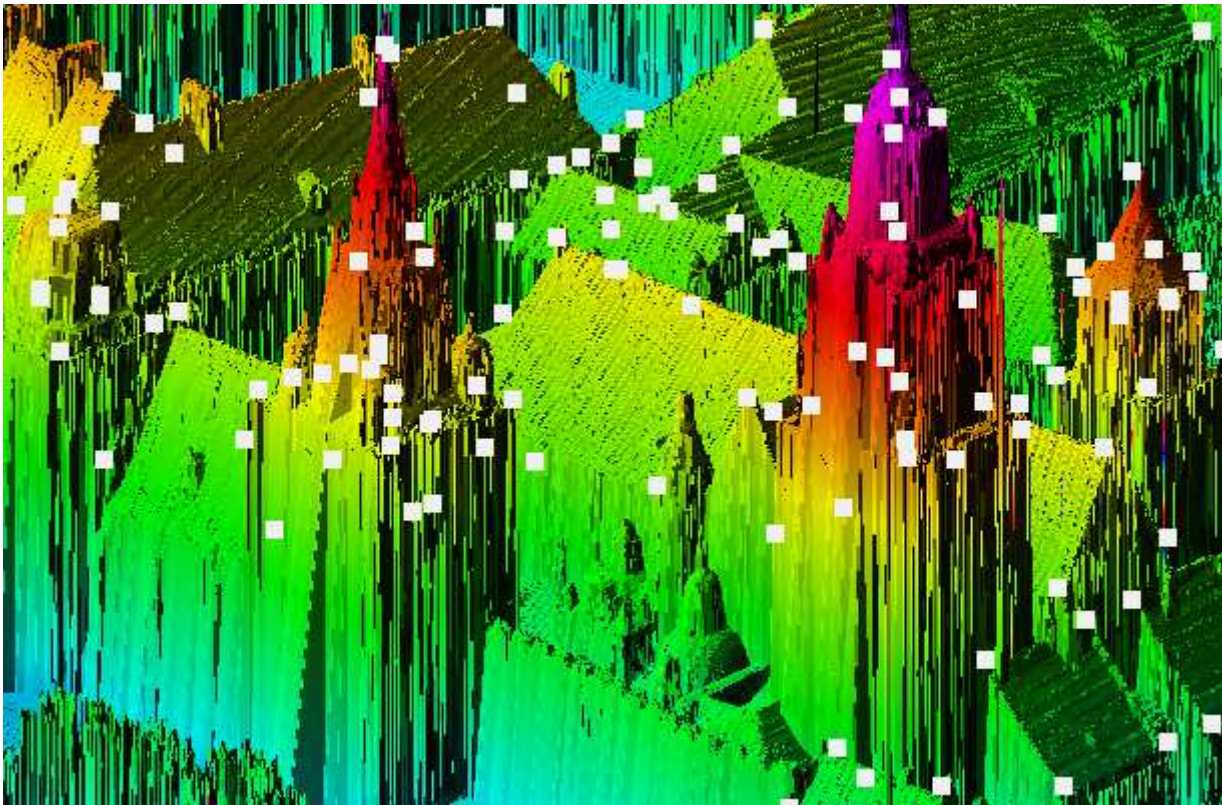
oraz dokładność wysokościową CE95 (circular error) zgodnie ze standardami NSSDA, według skróconego wzoru [Manue i inni, 2001]:

$$D_z = 1,9600 * RMSE_z$$

Analogicznie do  $RMSE_z$  obliczono  $RMSE_x$  oraz  $RMSE_y$ , a następnie sumaryczny błąd średni kwadratowy położenia  $RMSE_{xy}$ .

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

- opracowanie modelu 3D wybranego fragmentu miasta Krakowa przy wykorzystaniu „chmury punktów” pomiaru lidarowego,
- osadzenie na modelu 3D 235 przykładowo wybranych punktów (naroża i punkty załamania dachów) (ryc. 4),

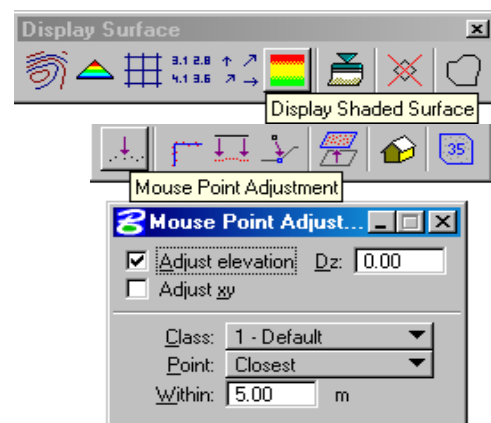


Ryc. 4. Punkty osadzone na modelu 3D

- obliczenie średniego błędu kwadratowego położenia  $RMSE_X$ ,  $RMSE_Y$ ,  $RMSE_{XY}$ , 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).

Do opracowania modelu 3D oraz osadzenia punktów na modelu zastosowano oprogramowanie firmy TerraSolid, w aplikacji nakładkowej TerraScan narzędzie *Mouse Point Adjustment* oraz w aplikacji TerraModeler narzędzia: *Display Shaded Surface*, *Display Contours*, *Display Triangles* (ryc. 5).

Funkcja *Mouse Point Adjustment* 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*) (ryc. 5).



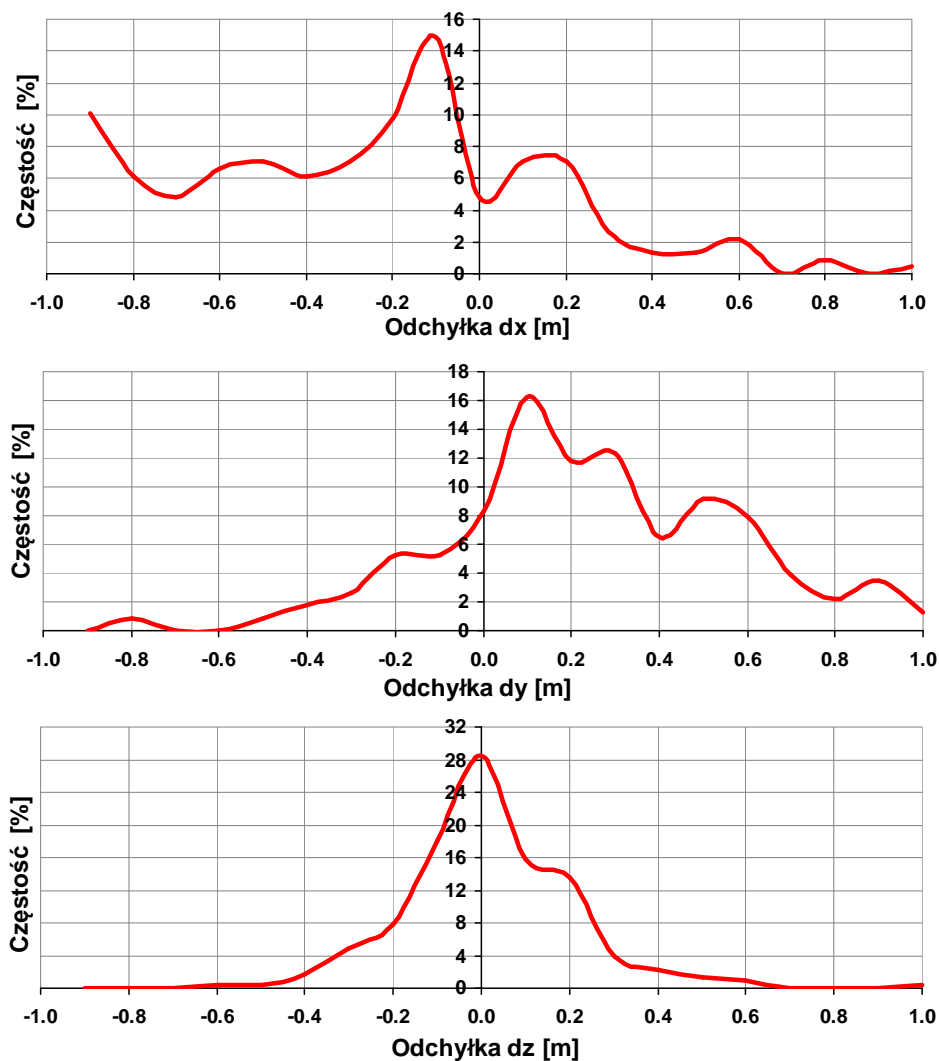
Ryc. 5. Narzędzia do osadzania punktów

Obliczenie odchyłek  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  wykazało występowanie błędu systematycznego, który został wyeliminowany poprzez odjęcie średniej odchyłki. Tablica 1 zawiera obliczone błędy średnie oraz dokładność wysokościową  $D_z$  przed i po korekcie błędu systematycznego.

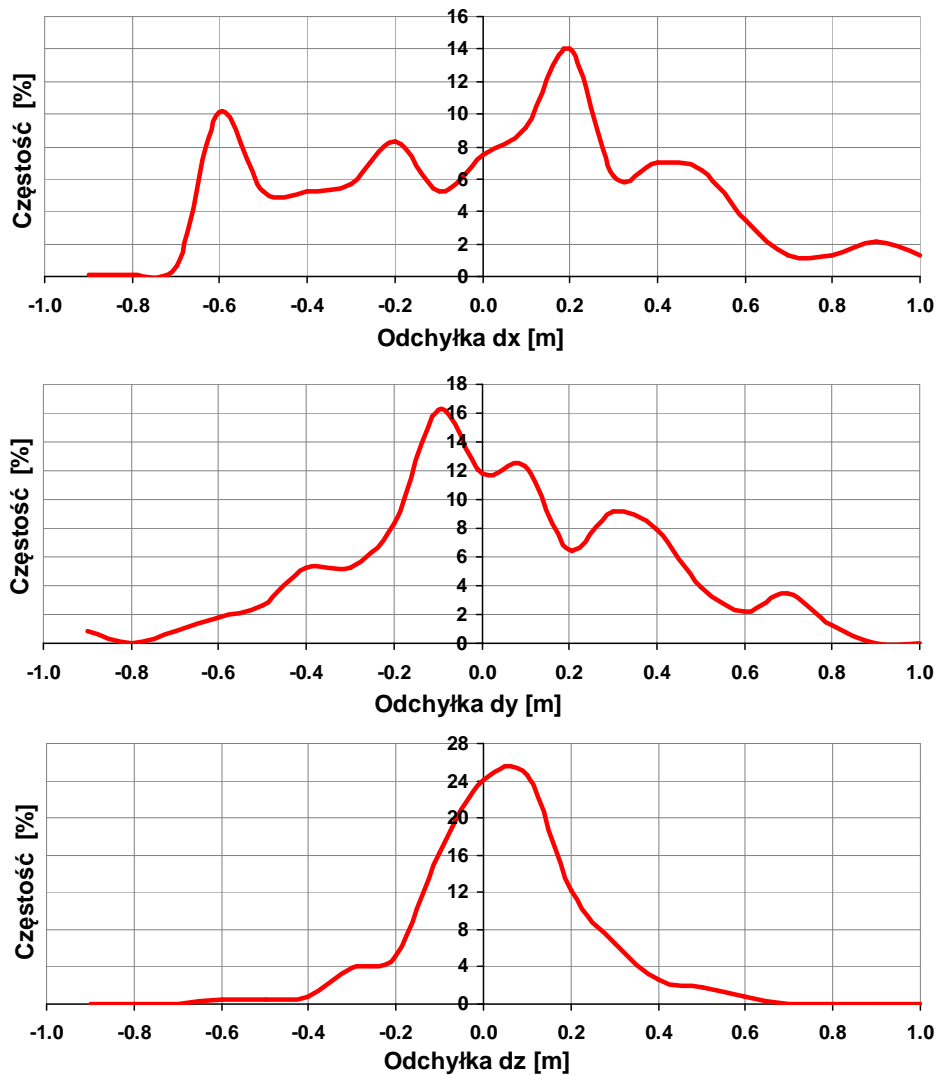
Tablica 1. Ocena dokładnościowa pomiaru lidarowego

	Przed korektą błędu systematycznego [cm]	Po korekcie błędu systematycznego [cm]
RMSE <sub>X</sub>	52	44
RMSE <sub>Y</sub>	41	35
RMSE <sub>XY</sub>	66	56
RMSE <sub>Z</sub>	20	19
D <sub>Z</sub>	39	37

Na rycinie 6 przedstawiono histogramy odchyłek  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  przed uwzględnieniem błędu systematycznego, natomiast rycina 7 ilustruje histogramy odchyłek  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  po korekcie błędu systematycznego.



Ryc. 6. Histogramy odchyłek  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  przed uwzględnieniem błędu systematycznego



Ryc. 7. Histogramy odchyłek  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  po korekcie błędu systematycznego

## 5. Zakończenie

Lotniczy skaniny laserowy pozwala na uzyskanie wysokich dokładności dla współrzędnej Z oraz mniejszych dla współrzędnych X i Y.

Zaproponowana analiza dokładnościowa lotniczego skaniny laserowego miasta Krakowa (przeprowadzonego w roku 2006) potwierdziła dużą dokładność współrzędnej Z (błąd średni  $RMSE_Z=19$  cm) oraz mieszczącą się w dopuszczalnych granicach dokładność położenia (błąd średni  $RMSE_{XY}=56$  cm).

Systemy lidarowe uzyskują wprawdzie dokładności wysokościowe punktów rzędu 5 – 15 cm, ale należy pamiętać o wysokich kosztach ich pozyskania. W praktyce wystarczającym zwykle przedziałem dokładności jest dla wysokości przedział 15-50 cm, a dla dokładności położenia 50-100 cm (Mercer, 2001).

1. Andersen H.E. 2002. *The use of airborne laser scanner data (LIDAR) for forest measurement applications*. WFCA. Washington. 2. Bucior M., Borowiec N., Jędrychowski I., Pyka K. 2006. *Wykrywanie budynków na podstawie lotniczego skanowania laserowego*. *Roczniki Geomatyki 2006, tom IV, zeszyt 3*, Warszawa. 3. Jędrychowski I. 2007. *Lotnicze skanowanie laserowe w Polsce*. *Polski Przegląd Kartograficzny, tom. 39, nr. 2*. PPWK Warszawa. 4. 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. 5. Maas, H-G. 2000. Least-Squares Matching with Airborne Laserscanning Data in a TIN Structure. IAPRS. 6. Maas, H-G. 2003. Planimetric and height accuracy of airborne laserscanner data: User requirements and system performance. Dresden. 7. Manue D. F. Editor. 2001. Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual. ASPRS, Maryland. 8. Wywiad GEODETY 2007. Wrocław to dachy!. Geodeta 1/2007, Warszawa. 9. Mercer B. 2001. Comparing LIDAR and IFSAR: What can you expect? Photogrammetric Week, Stuttgart. 10. Tarek Z. 2002. Skanowanie terenu laserem lotniczym. Geodeta 12/2002, Warszawa. 11. 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.*