

## **BADANIE DOKŁADNOŚCI NMT INTERPOLOWANEGO NA PODSTAWIE DANYCH LOTNICZEGO SKANINGU LASEROWEGO SYSTEMU SCALARS\***

Piotr Gołuch, Andrzej Borkowski, Grzegorz Józków

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

**Streszczenie.** Dokładność Numerycznego Modelu Terenu (NMT), interpolowanego na podstawie danych lotniczego skaningu laserowego, zależy od wielu czynników, m.in. od ukształtowania terenu, pokrycia terenu, stabilności nalotu fotogrametrycznego, jakości danych nawigacyjnych i dokładności kalibracji, terenowej wielkości śladu plamki promienia lasera (wysokości lotu i zbieżności wiązki), gęstości pozyskanych punktów, zastosowanej metody filtracji danych. W pracy przedstawiono ocenę dokładności NMT zrealizowanego dla 20-kilometrowego odcinka doliny rzeki Widawy na potrzeby modelowania hydrodynamicznego. Skaningu laserowego wykonano prototypowym skanerem ScaLARS, skonstruowanym w Instytucie Nawigacji Uniwersytetu w Stuttgarcie. Do rejestracji sygnału INS i GPS wykorzystano system Applanix POS/AV 510. Nalot wykonano samolotem AN-2, z wysokości 550 m. Terenowa wielkość śladu plamki lasera to około 0.6 m. Kalibrację systemu wykonano semi-automatycznie, uzyskując błąd bezwzględny w odniesieniu do obszarów kontrolnych, pomierzonych techniką GPS na poziomie 0.3 m wzdłuż i w poprzek do kierunku lotu oraz błąd wysokości 0.1 m. Badanie dokładności zbudowanego NMT przeprowadzono w oparciu o dane pozyskane z pomiaru terenowego technikami GPS i tachimetryczną. Wykonano pomiar na czterech reprezentatywnych obszarach obiektu badawczego. Filtrację danych przeprowadzono automatycznie z wykorzystaniem własnych algorytmów, bazujących na odpornej aproksymacji danych ruchomą powierzchnią wielomianową. W zależności od ukształtowania i pokrycia terenu uzyskano dokładności wysokościowe NMT od 0.17 m do 0.46 m.

**Słowa kluczowe:** lotniczy skaningu laserowego, NMT, ScaLARS

---

\* Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2005–2007 jako projekt badawczy nr 4T12E01729. Obliczenia wykonano w systemie MATLAB, licencja nr 101979, grant obliczeniowy Wrocławskiego Centrum Sieciowo-Superkomputerowego.

## WSTĘP

Dominującym źródłem danych do budowy Numerycznych Modeli Terenu (NMT) staje się w ostatnich latach lotniczy skaningu laserowy. Technika ta zapewnia zarówno wysoką dokładność, jak i szczegółowość numerycznego opisu powierzchni terenu, zwłaszcza na terenach zalesionych, gdzie pozyskiwanie danych innymi technikami jest praktycznie niemożliwe. Dokładność produktu finalnego (NMT), rozumiana jako różnica wysokości pomierzonej bezpośrednio w terenie techniką klasyczną a wysokości wyinterpolowanej z NMT, zależy od trzech czynników: dokładności danych źródłowych skaningu, zastosowanej metody filtracji i metody interpolacji NMT. Głównym czynnikiem determinującym dokładność NMT jest oczywiście dokładność danych źródłowych skaningu, na którą wpływa wiele czynników, m.in. stabilność nalotu fotogrametrycznego, jakość danych nawigacyjnych, dokładność kalibracji, wielkość śladu plamki promienia lasera (wysokości lotu i zbieżności wiązki) na powierzchni terenu, ukształtowanie terenu oraz pokrycie terenu [Gołuch et al. 2007]. Udział poszczególnych czynników trudno jest ocenić i dlatego należy rozpatrywać ich ogólny wpływ na dokładność produktu końcowego.

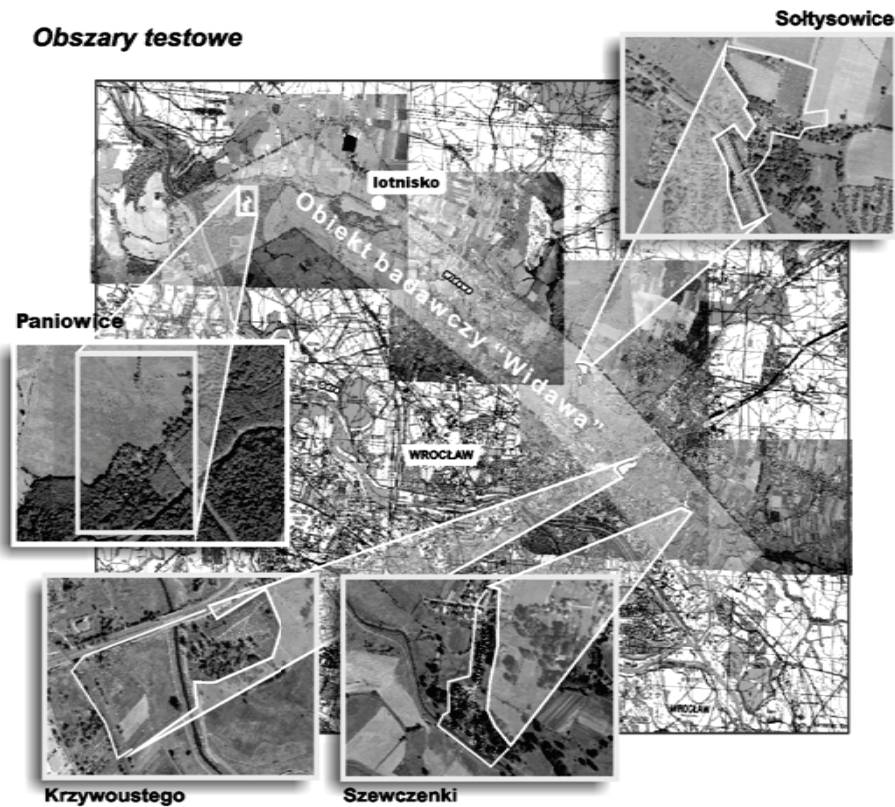
W publikacji [Gołuch i in. 2007] przedstawiono ocenę dokładności danych lotniczego skaningu laserowego systemu ScaLARS [Borkowski et al. 2006], w niniejszej pracy poddano ocenie dokładnościowej produkt końcowy w postaci NMT. Dane skaningu pozyskano w ramach realizacji projektu badawczego, dotyczącego budowy NMT doliny rzeki Widawy na potrzeby modelowania hydrodynamicznego. Dolina rzeki Widawy jest w znacznej części użytkowana rolniczo, natomiast jej ujściowy odcinek to obszar zalesiony. Występują tu liczne zagłębienia i wzniesienia powierzchni terenu. Filtrację danych przeprowadzono automatycznie z wykorzystaniem własnych algorytmów, bazujących na odpornej aproksymacji danych ruchomą powierzchnią wielomianową [Borkowski i Józków 2006]. Oprócz ilościowej oceny dokładności NMT przedstawiono w końcowej części pracy wyniki weryfikacji zbudowanego NMT w modelu hydrodynamicznym.

## OBIEKT BADAWCZY WIDAWA

Badania związane z oceną dokładności NMT interpolowanego na podstawie danych lotniczego skaningu laserowego ScaLARS były prowadzone na obiekcie badawczym „Widawa” [Borkowski et al. 2006]. Obiekt położony jest na północ od Wrocławia i swoim zasięgiem obejmuje ok. 40 km<sup>2</sup> doliny rzeki Widawy (rys. 1).

Skanowanie laserowe terenu zostało przeprowadzone w listopadzie 2005 r. z pokładu samolotu AN-2, z wysokości 550 m, przy użyciu systemu ScaLARS. Z uwagi na fakt, że obiekt badawczy (dolina rzeki) posiada szerokość ok. 2 km, skanowanie wykonano w 11 pasach. Szerokość jednego pasa skanowania w terenie wyniosła ok. 280 m, natomiast wzajemne pokrycie punktów pozyskanych z dwóch sąsiednich pasów skanowania zaplanowano na poziomie 30%.

Jednym z kryterium oceny poprawności zrealizowanego skanowania jest brak pustych obszarów (gaps) pomiędzy poszczególnymi pasami skanowania. Świadczy to o tym, że skanowanie zostało zrealizowane zgodnie z poprawnie wykonanym projektem lotu, oraz o stabilności i precyzji lotu. Czynniki te mają znaczny wpływ na ostateczną dokładność wyników skanowania.



Rys. 1. Obiekt badawczy „Widawa” z zaznaczonymi obszarami testowymi [Gołuch et al. 2007]  
 Fig. 1. Research area „Widawa” with marked testing areas [Gołuch et al. 2007]

Pierwsze obliczenia, związane z kalibracją wyników skanowania laserowego, przeprowadzone zostały przy użyciu oprogramowania LASCAL [Schiele et al. 2005]. Kalibracja została wykonana w oparciu o pola kontrolne, które pomierzono w terenie techniką GPS. Parametry kalibracji wewnętrznej skanera oraz parametry kalibracji wyników pomiaru w układzie lokalnym w odniesieniu do pól kontrolnych podano w pracy [Borkowski i Józków 2006]. W tabeli 1 zamieszczono ostateczne wartości charakteryzujące dokładność kalibracji, tj. obliczone odchyłki wzdłuż i w poprzek do kierunku lotu oraz obliczone odchyłki wysokościowe, jak również średnią wartość błędu bezwzględnego wzdłuż i w poprzek do kierunku lotu oraz składową wysokościową.

W celu oszacowania dokładności NMT interpolowanego na podstawie danych pozyskanych metodą lotniczego skaningu laserowego wytypowano na obiekcie badawczym cztery reprezentatywne obszary testowe o zróżnicowanym pokryciu terenu (rys. 1): Paniowice, Sołtysowice, Krzywoustego i Szewczenki. Nazwy obszarom badawczym nadano od nazw osiedli bądź ulic, w okolicach których są one zlokalizowane. Wytypowane obszary testowe znajdują się na krańcach obiektu badawczego oraz w jego części środkowej. Taki dobór położenia tych obszarów był podyktowany tym, aby ich lokali-

zacja była w znacznej odległości od płyty lotniska, względem której wykonano kalibrację systemu. Łącznie na obszarach testowych pomierzono 1728 punktów. Pomiar przeprowadzono bezpośrednio w terenie, wykorzystując technikę pomiaru GPS-RTK i metodę tachymetryczną. Ze względu na fakt, że dolina rzeczna charakteryzuje się dużą różnorodnością ukształtowania i pokrycia terenu, analizę przeprowadzono dla czterech kategorii terenu:

- las i zadrzewienia – teren o bardzo urozmaiconym ukształtowaniu, z licznymi lokalnymi obniżeniami i oczkami wodnymi;
- zarośla i wysoka trawa – obszar wzdłuż koryta rzeki, poza lasami, porośnięty zaroślami i bardzo wysoką trawą, z licznymi skarpami;
- łąki i pola orne – teren użytkowany rolniczo, generalnie obszar płaski; do tej kategorii włączono również pastwiska i nieużytki ze średnio wysoką trawą (wysokość ok. 40–60 cm);
- drogi – są to drogi gruntowe, brukowe i asfaltowe, wzdłuż tych dróg często występują drzewa i zarośla, także są rowy i nieduże skarpy.

Tabela 1 Zestawienie parametrów dokładności kalibracji względem pól kontrolnych  
Table 1. Parameters of calibration accuracy for the sake of control fields

	Wzdłuż kierunku lotu Along flight direction	Poprzecznie do kierunku lotu Across flight direction	Składowa wysokościowa Height component
Obliczone odchyłki Calculated deviations	± 0.6 m	± 0.4 m	± 0.15 m
Błąd bezwzględny (średnia wartość) Absolute error (mean value)	0.3 m	0.3 m	0.10 m

## POMIARY KONTROLNE I OCENA DOKŁADNOŚCI

Punkty pomierzone bezpośrednio w terenie zostały przyjęte jako bezbłędne dane referencyjne, gdyż błędy określenia ich wysokości są o rząd wielkości mniejsze niż błędy określenia wysokości punktów skaningu. Do pomiarów terenowych wykorzystano geodezyjne odbiorniki GPS Ashtech Z-Xtreme oraz elektroniczny tachimetr Leica TCR 407. Pomiar terenowy polegał na określeniu położenia punktów równomiernie rozmieszczonych na obszarach testowych z uwzględnieniem charakterystycznych punktów ukształtowania terenu. Większość punktów pomierzona została tachymetrycznie w oparciu o zamarkowane w terenie własne punkty osnowy. Współrzędne punktów osnowy wyznaczono metodą GPS. W celu zapewnienia dużej dokładności pomiarów GPS – na każdym punkcie osnowy uwzględniane były poprawki referencyjne ze stacji WROC permanentnych obserwacji GPS/GLONASS. Poprawki uzyskiwano bezpośrednio w terenie poprzez mobilny Internet i połączenie odbiornika GPS z laptopem. Niewielka odległość pól testowych od referencyjnej stacji GPS pozwoliła na wyznaczenie współrzędnych punktów osnowy (w szczególności wysokości) z dokładnością rzędu 1 cm.

Ponieważ znaczną część obszarów testowych stanowią tereny zadrzewione i zakrzewione, dlatego pomiary terenowe zostały wykonane przede wszystkim metodą tachymetryczną. Jedynie na obszarze testowym Paniowice dodatkowo wykonano na

terenie odkrytym pomiary GPS-RTK, gdzie umieszczony na punkcie osnowy pomiarowej odbiornik stał się stacją referencyjną transmitującą poprawki poprzez radiomodem.

W celu zapewnienia jednolitego układu współrzędnych dla pomiarów terenowych i skaningu laserowego współrzędne punktów osnowy przeliczone zostały do tego samego układu 1992 (współrzędne  $x, y$ ) i Kronsztad 1986 (wysokości  $h$ ), w którym wyrażone były dane skaningu. Przeliczenie współrzędnych punktów do układów PUWG 1992 i Kronsztad 1986 wykonane zostało za pomocą programu Transpol i własnych procedur napisanych w środowisku MATLAB.

W tabeli 2 przedstawiono liczbę punktów pomierzonych na każdym z obszarów testowych.

Tabela 2. Liczba punktów pomierzonych bezpośrednio w terenie  
Table 2. Number of points measured using GPS and total-station

Obszar testowy Testing area	Krzywoustego	Sołtysowice	Paniowice	Szewczenki
Liczba punktów osnowy Number of control points	2	4	7	7
Liczba punktów tachimetrycznych Number of total-station points	467	760	115	514
Liczba punktów GPS-RTK Number of GPS-RTK points	–	–	231	–

Numeryczny model terenu generowany jest na podstawie tych punktów zbioru danych skaningu laserowego, które są odbiciami od powierzchni terenu. Wszystkie punkty odbite od obiektów nieterenowych, muszą być wcześniej usunięte z chmury punktów. Zadanie to realizowane jest w znacznym stopniu automatycznie poprzez oprogramowanie służące do filtracji danych skaningu laserowego. W pracy wykorzystano własne algorytmy filtracji opracowane w środowisku MATLAB. Algorytmy bazują na odpornej aproksymacji powierzchni terenu wielomianem drugiego stopnia w każdym punkcie pomiarowym [Borkowski i Józków 2006]. Punkty będące odbiciami wiązki lasera od obiektów nieterenowych traktuje się w tym podejściu jako błędy grube. Odporna estymacja parametrów wielomianu lokalnego polega na modyfikacji wag punktów pomiarowych w zależności od residuów pomiędzy wysokością interpolowaną z wielomianu a pomierzoną. Jako funkcję tłumienia przyjęto funkcję Krausa [Kraus 2000]. W algorytmie wykorzystano również ideę filtracji hierarchicznej [Briese et. al. 2002] polegającą na stopniowym eliminowaniu punktów obiektów, gdzie w każdym kolejnym kroku eliminowane są punkty leżące coraz bliżej powierzchni terenu, jednak wciąż nie będące punktami terenowymi. Zbiory punktów wydzielone dzięki automatycznemu procesowi filtracji zostały manualnie sprawdzone i skorygowane. W tym celu wykorzystano stację fotogrametryczną ImageStation oraz zdjęcia lotnicze w skali 1:26000. Ręczna weryfikacja polegała na wyeliminowaniu błędów filtracji:

- typu pierwszego (punkty terenu sklasyfikowane przez algorytm jako punkty obiektów),
- typu drugiego (punkty obiektów sklasyfikowane przez algorytm jako punkty terenu).

W wyniku przeprowadzonej weryfikacji automatycznego procesu filtracji danych lotniczego skaningu laserowego otrzymano dla każdego obszaru testowego zbiory punktów terenowych, które posłużyły do zbudowania NMT.

Numeryczny model terenu wygenerowany został na stacji fotogrametrycznej ImageStation w postaci siatki TIN opartej na punktach terenowych skaningu. NMT przedstawiony w postaci siatki TIN reprezentuje najprostszą metodę interpolacji liniowej. Mimo że metoda ta nie odtwarza wiernie powierzchni terenu, jednak z racji dużej gęstości punktów skaningu (ok. 3 punkty na 1 m<sup>2</sup>) utworzony model terenu można uznać za bardzo szczegółowy.

Ze względu na różną dokładność danych źródłowych skaningu dla zróżnicowanych kategorii terenu [Gołuch i in. 2007], dokładność wygenerowanego NMT określono oddzielnie w każdej kategorii terenu. Zbiór punktów pomierzonych bezpośrednio w terenie (łącznie z punktami osnowy pomiarowej) podzielony został na podzbiory reprezentujące każdą kategorię terenu. Liczba punktów terenowych w każdym z obszarów testowych w rozbiciu na poszczególne kategorie terenu została przedstawiona w tabeli 3.

Tabela 3. Liczba punktów pomierzonych bezpośrednio w terenie w rozbiciu na kategorie terenu  
Table 3. Number of points measured using GPS and total-station in each type of terrain coverage

Rodzaj pokrycia terenu Type of land cover	Liczba punktów Number of points				
	Razem Overall	Obszary testowe Testing areas			
		Krzywoustego	Sołtysowice	Paniowice	Szewczenki
Las i zadrzewienia Wood, forestry terrain	730	65	34	110	521
Zarośla i wysoka trawa Thicket and high grass terrain	753	213	540	–	–
Łąki i pola orne Meadows, arable fields	574	159	172	243	–
Drogi Roads	50	32	18	–	–
Ogółem Total	2107	469	764	353	521

W każdym punkcie pomierzonym techniką klasyczną obliczona została różnica wysokości pomiędzy wartością wyinterpolowaną z NMT,  $Z_{NMT}$  a wartością pomierzoną w terenie,  $Z_{Ter}$ . Jako dokładność NMT przyjęto błąd średni  $m_{NMT}$  obliczony dla wszystkich wartości różnic wysokości  $dz = Z_{NMT} - Z_{Ter}$ , w każdej z kategorii terenu oddzielnie:

$$m_{NMT} = \sqrt{\frac{\sum dz^2}{n}}, \quad (1)$$

gdzie  $n$  jest liczbą punktów kontrolnych.

Zestawienie uzyskanych dokładności przedstawiono w tabeli 4. W dolnym wierszu tabeli podano [Gołuch i in. 2007] dokładności danych skaningu laserowego dla poszczególnych kategorii pokrycia terenu. Dokładności te zostały oszacowane na

podstawie bezpośrednich pomiarów terenowych, techniką GPS i tachymetryczną, punktów skaningu laserowego. Z porównania dwóch ostatnich wierszy tabeli wynika, że dokładność NMT jest nieznacznie gorsza od dokładności danych skaningu laserowego. Dokładność tych ostatnich danych jest czynnikiem decydującym o dokładności NMT. Podane w tabeli 4 wartości mediany i średniej wartości *dz* wskazują na występowanie pewnego błędu systematycznego. Obliczony na podstawie danych skaningowych NMT „leży” powyżej rzeczywistej powierzchni terenu od kilkunastu do kilkudziesięciu centymetrów. Wielkość ta wynika głównie z szorstkości powierzchni terenu.

Tabela 4. Dokładności NMT w zależności od pokrycia terenu  
Table 4. DTM accuracies depended on the landcover

	Rodzaj pokrycia terenu Type of landcover			
	Las i zadrzewienia Wood, forestry terrain	Zarośla i wysoka trawa Thicket and high grass terrain	Łąki i pola orne Meadows, arable fields	Drogi Roads
Liczebność n Quantity n	730	753	574	50
Minimalna wartość dz Minimal value of dz	[m] -1.20	-0.99	-0.31	-0.21
Maksymalna wartość dz Maximum value of dz	[m] 1.06	0.99	0.50	0.30
Mediana dz Median dz	[m] 0.12	0.32	0.23	0.14
Średnia wartość dz Mean value of dz	[m] 0.07	0.29	0.22	0.12
Średnia wartość bezwzględna dz Absolute mean value of dz	[m] 0.37	0.37	0.23	0.15
Dokładność NMT $m_{NMT}$ Accuracy of DTM $m_{NMT}$	[m] 0.46	0.44	0.27	0.17
Dokładność danych skaningu Accuracy of LIDAR data	[m] 0.33	0.33	0.23	0.16

## WERYFIKACJA W MODELU HYDRODYNAMICZNYM

W odniesieniu do modelowania hydrodynamicznego ważnym parametrem jest dokładność względna (bądź wewnętrzna) NMT, charakteryzująca dokładność wzajemnego usytuowania elementów powierzchni terenu. Pewien błąd systematyczny nie powinien mieć znaczenia – ważniejsze jest zachowanie spadków terenu. Dla zweryfikowania przydatności zbudowanego NMT przeprowadzono modelowanie hydrodynamiczne dla fragmentu doliny rzeki Widawy.

Dwuwymiarowe modelowanie hydrodynamiczne przeprowadzono w środowisku SMS (Surface-water Modeling System) na podstawie siatki dyskretnej, utworzonej w module Mesh. W projekcie dane z pozyskanego wysokodokładnego NMT były bezpośrednio importowane do modelu hydrodynamicznego. W module Mesh, na podstawie importowanych punktów, zbudowano sieć elementów metodą triangulacji. Następnie otrzymaną siatkę poddano weryfikacji, korzystając z funkcji oprogramowania

(np. w celu łączenia trójkątów, zamiany krawędzi podziału elementu czworokątnego na dwa elementy trójkątne czy wręcz usunięcia elementów). Na rysunku 2 przedstawiono, utworzoną w module Mesh programu SMS, siatkę elementów skończonych. Siatka ta zbudowana została na podstawie 34 573 punktów NMT, składa się z 47 332 punktów obliczeniowych (nodes) i posiada 23 317 elementów trójkątnych lub czworokątnych. Kiedy siatka dyskretyzacyjna budowana jest na podstawie NMT w postaci TIN, wówczas co prawda wymagany jest większy wkład pracy przy jej weryfikacji, ale w NMT o takiej strukturze mamy już uwzględnione elementy morfologiczne terenu, bardzo ważne przy modelowaniu przepływu wody (np. wały przeciwpowodziowe). Istotny jest również fakt, że liczba punktów w modelu terenu o strukturze TIN jest znacznie mniejsza niż w NMT o strukturze GRID (szczególnie w terenach płaskich) – jest to ważne zwłaszcza w dwuwymiarowym modelowaniu hydrodynamicznym, gdzie czas uzyskania rozwiązania jest proporcjonalny do kwadratu liczby punktów siatki.

W projekcie zamodelowano przepływ  $Q=130 \text{ m}^3/\text{s}$ , na który była zaprojektowana przez Niemców przepustowość doliny rzeki Widawy. Rysunek 3 ilustruje rozkład strug wody uzyskany w wyniku przeprowadzonego modelowania hydrodynamicznego. Otrzymany rozkład strug wody odpowiada, w ocenie hydrologa, wynikom otrzymanym z modelowań alternatywnych oraz z pomiarów wykonanych podczas powodzi w 1997 r. [Parzonka 2003]. Również inne parametry związane z modelowaniem hydrodynamicznym potwierdziły przydatność zbudowanego NMT. Szersze przedstawienie problematyki związanej z modelowaniem hydrodynamicznym wykracza poza ramy tego artykułu.



Rys. 2. Siatka dyskretyzacyjna utworzona na podstawie punktów NMT  
Fig. 2. Discrete mesh based upon DTM points





Rys. 3. Układ strug wody przy modelowanym przepływie  $Q=130 \text{ m}^3/\text{s}$   
 Fig. 3. Arrangement of flow trace in modelled flow of  $Q=130 \text{ m}^3/\text{s}$

## PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki oceny dokładności numerycznego modelu terenu interpolowanego na podstawie danych lotniczego skaningu laserowego systemu ScaLARS. Wysokości uzyskane z NMT zostały porównane z przyjętymi jako bezbłędne wysokościami punktów pomierzonych bezpośrednio w terenie. Na tej podstawie obliczono dokładność NMT, która w zależności od ukształtowania i pokrycia terenu wyniosła od 17 do 46 cm. Największy wpływ na dokładność NMT ma dokładność danych źródłowych skaningu, która jest różna dla zróżnicowanych kategorii terenu. Dla terenów płaskich, na których pokrycie (szczególnie roślinnością) nie występuje (np. drogi) dokładność NMT wynosi 17 cm i jest zbliżona do dokładności danych źródłowych skaningu, która wynosi 16 cm [Gołuch i in. 2007]. Natomiast jednocześnie ze wzrostem wysokości oraz gęstości roślinności pokrywającej teren dokładność NMT zmniejsza się w stosunku do dokładności danych źródłowych. Spowodowane jest to głównie mniejszą gęstością punktów terenowych skaningu, przez co model terenu w większym uproszczeniu opisuje lokalne struktury terenu. Fakt ten ma szczególne znaczenie dla terenów o mocno zróżnicowanej powierzchni (zagłębienia terenu, skarpy). Najmniejszą dokładność NMT uzyskano dla terenów leśnych oraz zadrzewionych; wyniosła ona 46 cm. Dla tej kategorii terenu również dokładność danych źródłowych jest najgorsza i wynosi 33 cm. W tym przypadku proces filtracji danych skaningu spowodował zmniejszenie gęstości punktów w stosunku do terenów nie porośniętych roślinnością, przez co dla terenów leśnych numeryczny model terenu oparty na siatce TIN ma mniejszą rozdzielczość, a w efekcie również dokładność.

W kontekście uzyskanych wartości różnic pomiędzy dokładnościami NMT i danych źródłowych skaningu należy uznać, że proces filtracji przeprowadzony został prawidłowo i wraz z wybraną metodą interpolacji NMT nie ma znaczącego wpływu na dokładność numerycznego modelu terenu interpolowanego na podstawie danych

lotniczego skaningu laserowego. Poza dokładnością danych źródłowych skaningu największy wpływ na dokładność NMT ma rodzaj pokrycia terenu.

## PIŚMIENNICTWO

- Borkowski A., Gołuch P., Wehr O., Schiele M., Thomas M., 2006. Airborne laser scanning for the purpose of hydrodynamic modelling of Widawa river valley. Reports on Geodesy, No 2(77), pp. 85–94.
- Borkowski A., Józków G., 2006. Wykorzystanie wielomianowych powierzchni ruchomych w procesie filtracji danych pochodzących z lotniczego skaningu laserowego. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. XVI, 63–73.
- Briese C., Pfeifer N., Dorninger P., 2002. Applications of the robust interpolation for DTM de-termination. Symposium ISPRS Commission III, Photogrammetric Computer Vision, Graz, 9–13 September 2002. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV / 3A, 55–61.
- Gołuch P., Borkowski A., Józków G., 2007. Ocena dokładności danych lotniczego skaningu laserowego systemu ScaLARS. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. XVII, s. 261–270.
- Kraus K., 2000. Photogrammetrie. Band 3. Topographische Informatonssysteme. Dümmler, Köln.
- Parzonka W., 2003. Ocena przepustowości doliny Widawy dla przeprowadzenia przepływów powodziowych Odry. Praca zbiorowa pod red. W. Parzonki, Zesz. Nauk. AR Wrocław nr 454.
- Schiele O., Wehr A., Kleusberg A., 2005. Operational Calibration of Airborne Laserscanners by Using LASCAL. Proc. Optical 3-D Measurement Techniques, vol. 1, Vienna Oct. 3–5, pp. 81–89.

## STUDY OF ACCURACY OF DTM INERPOLATED FROM AIRBORNE LASER SCANNING DATA OF SCALARS SYSTEM

**Abstract.** Accuracy of Digital Terrain Model (DTM) generated from airborne laser scanning data depends on many factors, e.g. terrain structures, landcover, stability of photogrammetric flight, quality of navigation data, accuracy of calibration, size of laser footprint on terrain (height of flight and convergence of laser beam), density of captured points, method of raw ALS data filtering. In this work the accuracy determination of DTM generated for 20-kilometer part of valley of Widawa river was presented. This DTM was used in hydrodynamic modelling. Airborne laser scanning was carried out using prototypic ScaLARS scanner (developed in Institute of Navigation of Stuttgart University). INS and GPS signals were registered by Applanix POS/AV 510 system. Photogrammetric flight using AN-2 aeroplane was made from height of 550 m. Footprint of laser beam had on the terrain size of about 0.6 m. Calibration of system was carried out semi-automatically. In the reference of GPS measured control fields relative error was estimated on the level about 0.3 m (along and across the flight direction) and error of height was about 0.1 m. Research of accuracy determination of generated DTM was carried out based upon fields measurements using GPS and tacheometric techniques. The measure-

ments were made for four representative fields of study area. Data filtering was carried out using own algorithms based upon robust estimation of moving polynomial surface to scanning data. Depending on the terrain landscape and landcover DTM accuracy was evaluated from value 0.17 m to 0.46 m.

**Key words:** airborne laser scanning, DTM, ScaLARS

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 30.06.2008

Do cytowania – For citation: Gołuch P., Borkowski A., Józków G., 2008. Badanie dokładności NMT interpolowanego na podstawie danych lotniczego skaningu laserowego systemu ScaLARS. *Acta Sci. Pol. Geodesia et Descriptio Terrarum*, 7(2), 37–47.