

## REJESTRACJA DOLINY RZEKI WIDAWY Z WYKORZYSTANIEM LOTNICZEGO SKANOWANIA LASEROWEGO

### REGISTRATION OF THE WIDAWA RIVER VALLEY USING AIRBORNE LASER SCANNING

Andrzej Borkowski<sup>1</sup>, Piotr Gołuch<sup>1</sup>, Aloysius Wehr<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instytut Geodezji i Geoinformatyki,  
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

<sup>2</sup>Institut für Navigation, Universität Stuttgart

**SŁOWA KLUCZOWE:** lotniczy skaning laserowy, ScaLARS, numeryczny model terenu, numeryczny model pokrycia terenu, modelowanie hydrodynamiczne

**STRESZCZENIE:** W ramach projektu badawczego wykonano skaning laserowy doliny rzeki Widawy, w okolicy Wrocławia. Wykorzystano w tym celu prototypowy skaner ScaLARS (CW scanner), skonstruowany w Instytucie Nawigacji Uniwersytetu Stuttgarta, a do rejestracji sygnału GPS i INS wykorzystano system Applanix POS/AV 510. Skaning wykonano dla 20 kilometrowego ujściowego odcinka rzeki Widawy w pasie o szerokości 2 km. Zarejestrowano około 150 milionów punktów ze średnią rozdzielczością około 3 pkt/m<sup>2</sup> i dokładnością wysokościową na poziomie 0.2 m. Skaning laserowy doliny Widawy wykonany został dla pozyskania danych dla potrzeb modelowania hydrodynamicznego. W pracy podano podstawowe informacje dotyczące systemu ScaLARS, oraz doświadczenia związane z realizacją projektu. Omówiono produkty pochodne skaningu oraz ich przydatność w procesie modelowania hydrodynamicznego.

#### 1. WPROWADZENIE

Lotniczy skaning laserowy jest nowoczesną technologią pomiarową, która zrewolucjonizowała w ostatnich latach proces pozyskiwania danych o powierzchni topograficznej i obiektach znajdujących się na niej, zwłaszcza w terenach zalesionych i zadrzewionych. Standardowe produkty pochodne lotniczego skaningu laserowego: numeryczne modele terenu (NMT) i numeryczne modele pokrycia terenu (NMPT) znajdują zastosowanie w różnorodnych zagadnieniach projektowych i inżynierskich.

Modelowanie hydrodynamiczne to głównie matematyczny opis przepływu wody w dolinie rzeki. Celem modelowania przepływu wód katastrofalnych jest ustalenie położenia zwierciadła wody na terenach zalewowych oraz określenie stref zagrożenia powodziowego. Dokładność oraz wiarygodność modelowania hydrodynamicznego zależy, w znacznym stopniu, od dokładności i wiarygodności opisu doliny rzeki w modelu numerycznym. Ważna jest zarówno dokładność geometryczna, zwłaszcza wysokościowa, jak i odpowiednia szczegółowość odwzorowania powierzchni terenu w modelu.

Inwentaryzacja powierzchni terenu, a zwłaszcza takich jej elementów jak skarpy i obwałowania, z niedostateczną dokładnością i szczegółowością lub co gorsze ich pominięcie w modelu numerycznym, musi prowadzić do zafałszowania wyników modelowania hydrodynamicznego. Biorąc pod uwagę również fakt, że tereny zalewowe rzek to nierzadko tereny zadrzewione i zakrzewione, skaning laserowy jest technologią nie mającą konkurencji w pozyskiwaniu danych dla potrzeb modelowania hydrodynamicznego. Aktualna rozdzielczość tej technologii, kształtująca się na poziomie kilku punktów na metr kwadratowy gwarantuje bowiem wymaganą dla tego modelowania szczegółowość odwzorowania powierzchni terenu w modelu numerycznym.

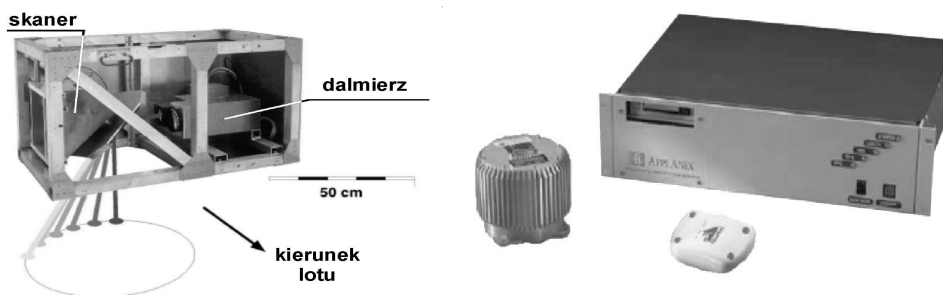
W ramach realizacji projektu badawczego wykonano lotniczy skaning laserowy doliny rzeki Widawy, z wykorzystaniem prototypowego systemu ScaLARS. Poniżej przedstawione są podstawowe informacje dotyczące tego systemu oraz możliwe do otrzymania produkty pochodne skaningu. Dyskutowana jest też ich przydatność w procesie modelowania hydrodynamicznego.

## 2. SYSTEM ScaLARS

Lotniczy skaning laserowy jest technologią integrującą w sobie trzy niezależne techniki pomiarowe:

- GPS (Global Navigation System) służący do wyznaczania pozycji,
- INS (Inertial Navigation System) służący do określania kątów orientujących platformę pomiarową w przestrzeni,
- LRF (Laser Range Finder) służący do laserowego pomiaru odległości do punktów na powierzchni ziemi.

Całość uzupełnia platforma pomiarowa, na której jest on przenoszony.



Rys. 1. Skaner laserowy ScaLARS (po lewej) i Applanix POS/AV 510 (po prawej)

Kluczowym elementem prezentowanego systemu skaningu laserowego jest skaner laserowy ScaLARS (Scanning Laser Altimeter and Reflectance System). Skaner ten (rys. 1) jest prototypowym urządzeniem, skonstruowanym w Instytucie Nawigacji Uniwersytetu Stuttgart. W przeciwieństwie do konstrukcji komercyjnych, które są skanerami impulsowymi, ScaLARS wykorzystuje falę ciągłą modulowaną dwoma częstotliwościami. Podstawowe parametry techniczne skanera zestawiono w tabeli 1. Dalsze szczegóły oraz dyskusję wad i zalet takiego rozwiązania, w odniesieniu do rozwiązań komercyjnych,

można znaleźć w pracy (Wehr, Lohr, 1999). Charakterystyczną cechą skanera ScaLARS jest rozkład punktów pomiarowych na powierzchni ziemi. Wiązka laserowa odchylana jest za pomocą rotującego lustra nutacyjnego. Wskutek złożenia tego ruchu z ruchem samolotu, punkty pomiarowe rozłożone są wzdłuż przesuwanej się (pseudo) elipsy (rys. 1).

Tabela 1. Podstawowe parametry techniczne skanera ScaLARS

Parametr	Wartość
Źródło światła laserowego (fala ciągła)	CW laser diode InGa(Al)As
Detektor	SI avalanche Photodiode
Moc lasera	0.8 W
Długość fali	810 nm (IR)
Częstotliwość modulacji fali	10 MHz, 1 MHz
Maksymalny zasięg pomiaru	~ 750 m
RMS (95 %)	0.03 m .. 0.16 m
Zbieżność wiązki	1 mrad
Częstotliwość próbkowania	7,69 kHz
Częstotliwość obrotu lustra	20 Hz
Rozdzielczość pomiaru intensywności	13 bit
Pole widzenia (FOV)	28° or 40°

Do rejestracji sygnału GPS i INS wykorzystywany jest zintegrowany system orientacji i pozycjonowania POS/AV 510 (Applanix Corp., Canada) (rys. 1.) zawierający:

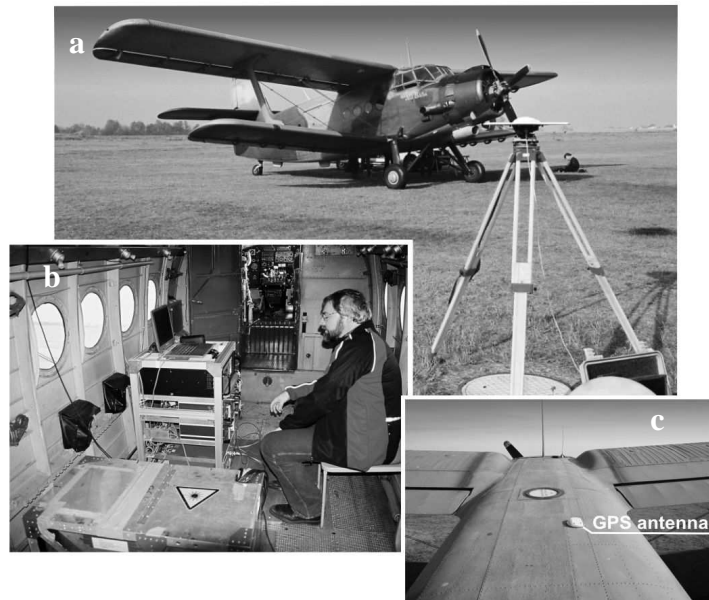
- inercyjną jednostkę pomiarową (Inertial Measurement Unit - IMU),
- odbiornik GPS NovAtel OEM,
- komputerowy system pozycjonowania i orientacji Applanix,
- interfejsy komunikacyjne i jednostki składowania danych,
- komputer sterujący (Notebook).

### 3. PROJEKT WIDAWA

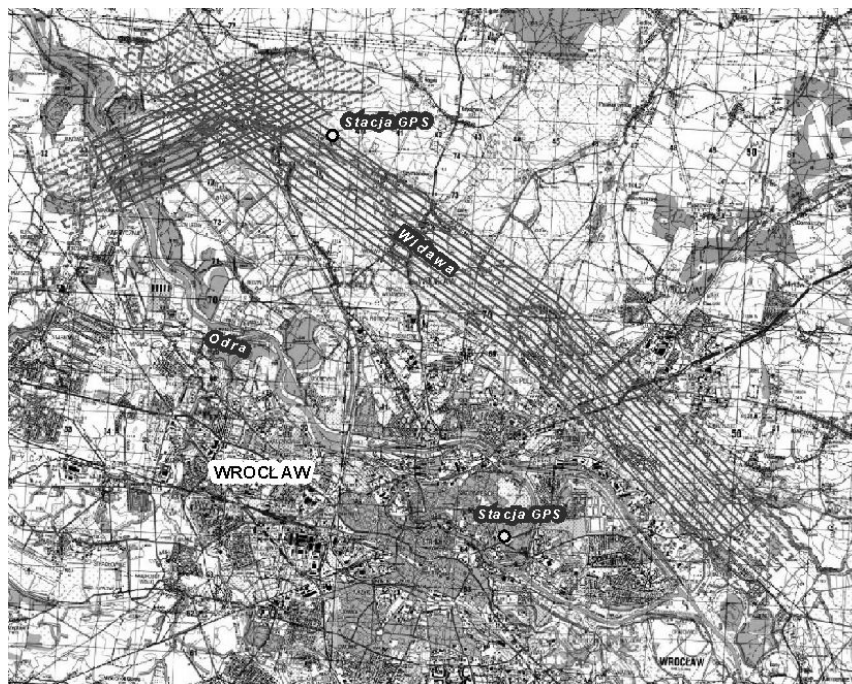
System ScaLARS zamontowany na pokładzie samolotu AN-2 wykorzystano do wykonania skaningu doliny rzeki Widawy. Po zamontowaniu wszystkich elementów systemu należy pomierzyć parametry ekscentryczne pomiędzy anteną GPS (rys. 2c) a ramą skanera, do której przymocowana jest jednostka IMU. Obserwacje GPS na stacjach referencyjnych wykonano odbiornikami Trimble 4700 (rys. 2a).

Obszar opracowania, obejmujący 20 kilometrowy ujściowy odcinek rzeki Widawy, wraz z projektem lotu i rozmieszczeniem stacji referencyjnych przedstawiono na rysunku 3. Zeskanowano obszar o szerokości 2 km. Nalot wykonano przy następujących parametrach projektowych:

- prędkość lotu: 150 km/h,
- wysokość lotu: 550 m,
- szerokość pasa skanowania: 280 m,
- odstęp pomiędzy osiami lotu: 190 m,
- liczba pasów skanowania: 11.



Rys. 2. Stacja referencyjna GPS (a), skanner i jednostka pomiarowa (b), samolotowa antena GPS (c)



Rys. 3. Mapa obszaru opracowania z projektem lotu

Czynnikiem decydującym o jakości danych skaningu laserowego jest właściwa kalibracja systemu. Dlatego, przed właściwym skanowaniem wykonano lot kontrolny mający na celu kalibrację systemu. Kalibrację wykonano w oparciu o pola kontrolne zlokalizowane w obrębie lotniska, zasygnalizowane i pomierzone techniką GPS. Kalibrację wykonano semi-automatycznie, z wykorzystaniem oprogramowania LASCAL (Schiele, 2005; Schiele *et al.*, 2005), w którym parametry kalibracji estymowane są w oparciu o model Gaussa-Markowa. Parametry kalibracji i ich błędy zestawiono w tabeli 2. Proces przetwarzania danych skaningu przedstawiono w pracach (Borkowski *et al.*, 2006; Thiel, Wehr, 2001).

Ostatecznym wynikiem opracowania jest zbiór współrzędnych punktów {B,L,H} w układzie WGS84. W omawianym projekcie zarejestrowano ostatecznie około 150 milionów punktów ze średnią gęstością około 3 pkt./m<sup>2</sup>.

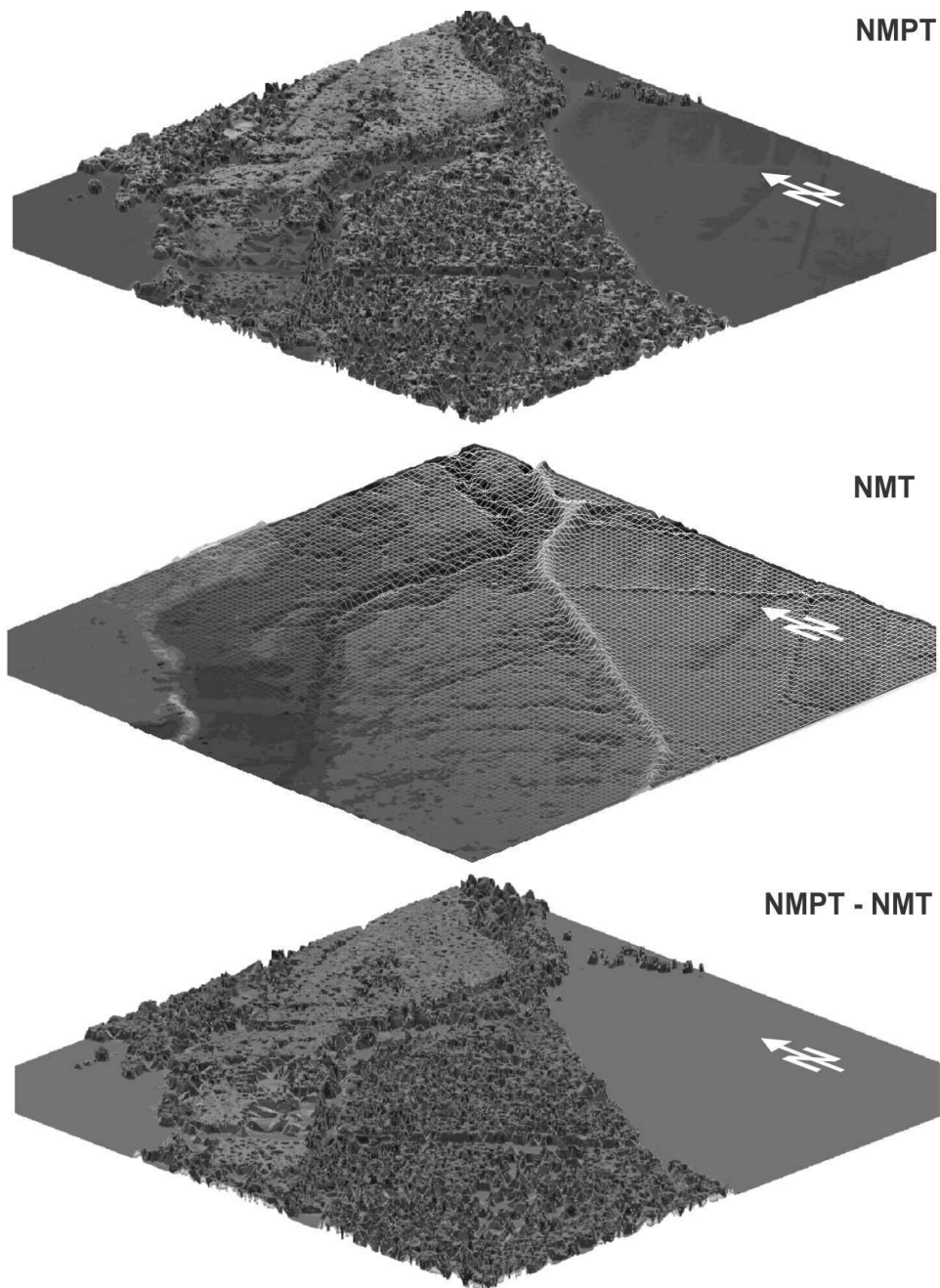
Ocenę dokładności danych skaningu przeprowadzono w oparciu o mapę zasadniczą. Pod uwagę wzięto, te elementy mapy, których wysokości podane są z dokładnością 1 cm, głównie armaturę naziemną uzbrojenia podziemnego. W ten sposób oszacowano dokładność wysokościową danych skaningu na około 0.2 m.

Tabela 2. Parametry kalibracji wewnętrznej skanera i parametry kalibracji wyników pomiaru w układzie lokalnym w odniesieniu do pól testowych (tabela dolna)

	parametr	wartość	odchylenie standardowe
skaner	kąt wirowania $\gamma_M$	6.895 deg	$\pm 0.007$ deg
kąty obrotu układu skaner względem IMU	poprzeczny $\delta_\omega$	+0.636 deg	$\pm 0.010$ deg
	podłużny $\delta_\varphi$	-0.476 deg	$\pm 0.010$ deg
	skręcenie $\delta_\kappa$	-0.466 deg	$\pm 0.056$ deg
przesunięcie	offset <i>Add</i>	+0.143 m	$\pm 0.048$ m
pole widzenia (FOV)	poprzecznie do kierunku lotu	27.580 deg	-
	wzdłuż kierunku lotu	19.306 deg	-
	wzdłuż kierunku lotu	poprzecznie do kierunku	składowa wysokościowa
Obliczone odchyłki	$\pm 0.6$ m	$\pm 0.4$ m	$\pm 0.15$ m
Błąd bezwzględny (średnia wartość)	0.3 m	0.3 m	0.1 m

#### 4. PRODUKTY POCHODNE SKANINGU LASEROWEGO

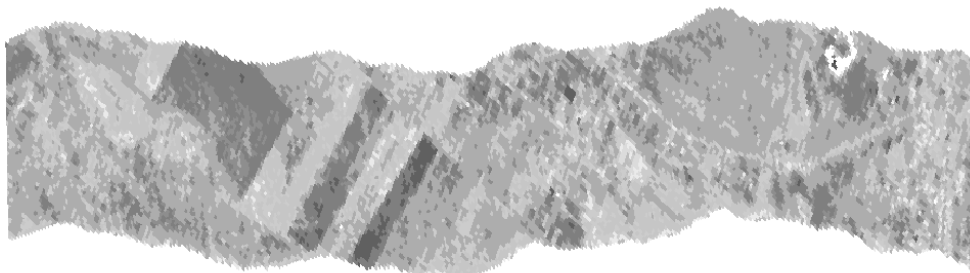
Dane punktowe skaningu, po transformacji do obowiązującego na danym obszarze układu współrzędnych, na przykład PUWG 1992 i Kronsztadt 86, są podstawą do



Rys. 4. Typowe produktu skaningu laserowego (fragment doliny rzeki Widawy)

generowania różnych produktów pochodnych. Najbardziej typowe przedstawiono dla fragmentu obszaru opracowania na rysunku 4. Po wyeliminowaniu ze zbioru punktów będących efektem wielotorowości oraz odbić nietypowych, na przykład od przelatujących ptaków, możliwa jest interpolacja NMPT. Numeryczny model powierzchni topograficznej (NMT) można wyinterpolować dopiero po eliminacji punktów będących odbiciami od pokrycia terenu. Trzeba przyznać, że proces ten jest wciąż bardzo pracochłonny i skomplikowany, pomimo licznych algorytmów semi-automatycznej filtracji (Borkowski, 2004). Po odjęciu NMT od NMPT powstaje model różnicowy obrazujący pokrycie terenu. Wszystkie te modele mają kluczowe znaczenia dla modelowania hydrodynamicznego. Wykorzystywane są do symulacji przepływu wód wielkich oraz do estymacji współczynników oporu.

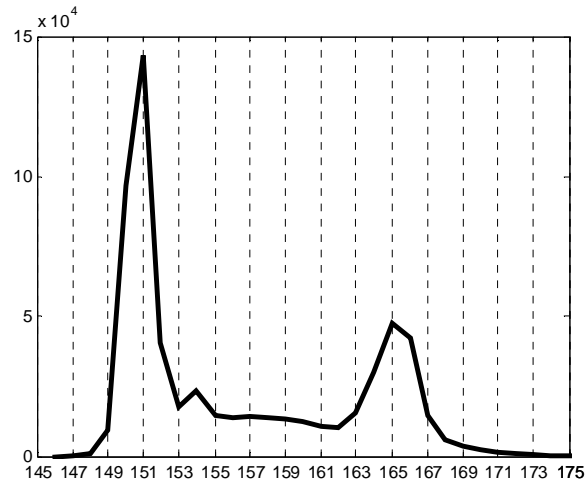
System ScaLARS rejestruje również intensywność odbicia promienia laserowego. W obrazie intensywności widoczne są obiekty typu: budynki, drogi, obwałowania, ale również różne formy pokrycia terenu, wynikające z różnych form użytkowania. Przykładowy obraz intensywności pokazano na rysunku 5. Obraz intensywności wykorzystywany jest, jako jedna z cech, do klasyfikacji form pokrycia terenu (Tymków, Borkowski, 2006). Na etapie opracowania danych, obraz intensywności wykorzystywany jest w procesie kalibracji.



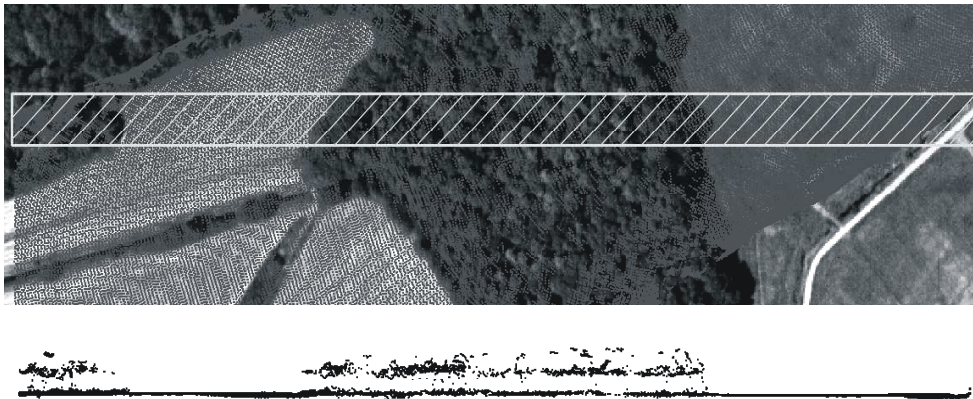
Rys. 5. Przykładowy obraz intensywności

Modelowanie hydrodynamiczne, w szczególności estymacja współczynników oporu na terenach zalesionych, wymaga określenia szeregu parametrów, przykładowo: rodzaj lasu i jego zasięg, wysokości pierwszej partii gałęzi, zwartość drzewostanu, ilość masy drzew na jednostkę powierzchni itp. Część tych parametrów można oszacować pośrednio, wykorzystując obraz intensywności, czy informację o przestrzennym rozkładzie punktów pomiarowych. Rysunek 6 przedstawia liczbę punktów (odbić promienia laserowego) na jednostkę powierzchni lasu (w tym przypadku 500 m×500 m) w zależności od ich wysokości. Z rysunku widać, że dominująca część punktów pomiarowych leży na powierzchni ziemi, na wysokości 151 m. Trzy metry nad powierzchnią terenu widoczne jest pierwsze piętro lasu i dalej wysokość lasu wynosząca około 14 m. Takie analizy mają oczywiście sens wtedy, gdy deniwelacje na analizowanej jednostce powierzchni są niewielkie.

Do omawianych analiz wykorzystane mogą być również profile pionowe rozkładu punktów pomiarowych. Rysunek 7 przedstawia profil pionowy z odpowiednim odniesieniem do ortofotomapy.



Rys. 6. Liczba punktów pomiarowych na poszczególnych poziomach wysokości, przypadająca na jednostkę powierzchni



Rys. 7. Rozkład punktów pomiarowych w profilu

## 5. PODSUMOWANIE

Lotniczy skaning laserowy jest szybką metodą pozyskiwania szczegółowej informacji o powierzchni terenu. Zarówno osiągnięta dokładność wysokościowa jak i rozdzielczość są wystarczające dla potrzeb modelowania hydrodynamicznego.

Wykonany skaning laserowy systemem ScaLARS potwierdził skuteczność tego systemu, również w terenie podmokłym, jednak ze względu na absorpcję wiązki laserowej przez wodę, skaning dolin rzecznych najlepiej wykonywać w okresie niskiego poziomu wody. Otrzymana rozdzielczość, na poziomie 3 pkt./m<sup>2</sup> zapewnia szczegółową



inwentaryzację systemu obwałowań. Dokładność wysokościową oszacowano na podstawie elementów armatury uzbrojenia podziemnego, na poziomie około 0.2 m. Należy jednak, ze względu na specyfikę systemu, spodziewać się pogorszenia dokładności na obszarach zalesionych. Szczegółowa analiza dokładności będzie przedmiotem dalszych prac.

Z punktu widzenia modelowania hydrodynamicznego metoda skaningu laserowego wydaje się szczególnie przydatna ponieważ:

- NMT wykorzystany jest do modelowania przepływu wody wielkiej,
- model różnicowy (NMPT-NMT) wykorzystywany jest do klasyfikacji pokrycia terenu i estymacji współczynników oporu,
- obraz intensywności wykorzystywany jest również do klasyfikacji pokrycia,
- rozkład przestrzenny punktów pomiarowych na terenach zalesionych wykorzystywany jest do oszacowania niektórych parametrów lasu.

## 6. LITERATURA

Borkowski A., 2004. Modellierung von Oberflächen mit Diskontinuitäten. *Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr 575*, München.

Borkowski A., Gołuch P., Wehr A., Schiele O., Thomas M. 2006. Airborne laser scanning for the purpose of hydrodynamic modelling of Widawa river valley. *Rapports on Geodesy* (w druku).

Schiele O., 2005. Ein operationelles Kalibrierverfahren für das flugzeuggetragene Laserscannersystem ScaLARS. *Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr 592*.

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, s. 81-89.

Thiel K.-H., Wehr A., 2001. Operational Production of DTMs Using ScaLARS. *Proc. of OEEPE workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models*, 1-3 March, Stockholm.

Tymków P., Borkowski A., 2006. Wykorzystanie danych lotniczego skaningu laserowego do nadzorowanej klasyfikacji pokrycia terenu dla potrzeb modelowania hydrodynamicznego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 16 (w druku).

Wehr A., Lohr U., 1999. Airborne laser scanning - an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54, s. 68-82.

Praca naukowa finansowana w latach 2005-2007 ze środków na naukę jako projekt badawczy nr 4T12E0172.

## REGISTRATION OF THE WIDAWA RIVER VALLEY USING AIRBORNE LASER SCANNING

KEY WORDS: airborne laser scanning, ScaLARS, digital terrain model, digital surface model, hydrodynamic modelling

### Summary

Airborne Laser Scanning (ALS) is a modern technology, which within last years has revolutionized the process of collecting data on terrain topography, especially in afforested terrains and wooded areas. The laser scanning system integrates three measuring techniques: GPS, INS and laser scanning.

The airborne laser scanning of the Widawa river valley near Wrocław was performed in the research project. A prototype scanner - ScaLARS, constructed at Institute of Navigation, University of Stuttgart, was used. The Applanix POS/AV 510 system (Position and Orientation System for Airborne Vehicles) was used for GPS and INS signals registration. The ScaLARS, as opposed to commercial systems, uses the Continuous Wave (*CW scanner*).

The project involved scanning 20 kilometres of the Widawa river estuary with a width range of about 2 km. The calibration of system was executed in support of control areas measured by GPS techniques. The mean error of calibration in reference to control areas carried out 0.3 m along the flight direction and across the flight direction, as well as 0.1 m in the vertical direction. About 150 million points were registered with an average resolution of about 3pts / m<sup>2</sup>. The vertical accuracy of laser scanning was estimated at the level of 0.2 m based upon a large-scale map (1:500) using infrastructure elements.

The laser scanning of the Widawa river valley was executed in order to collect data for hydrodynamic modelling. Traditionally, the laser scanning data is used for generation of Digital Terrain Models (DTM) and Digital Surface Models (DSM). The spatial distribution of laser points on forest terrain is also useful information for hydrodynamic modelling. The ScaLARS system also records the intensity of the reflection of the laser ray as well as the quality parameters of the registered returned signal. Moreover, this information can be helpful in classifying land cover that is necessary in hydrodynamic modelling.

In this paper, the basic data on the ScaLARS system and the research carried out while implementing the project were presented. Additional products of laser scanning, as well as their usefulness in hydrodynamic modelling were also shown.

Dr hab. inż. Andrzej Borkowski  
e-mail: borkowski@kgf.ar.wroc.pl  
tel. +71 3205609

Dr inż. Piotr Gołuch  
e-mail: goluch@kgf.ar.wroc.pl  
tel. +71 3205693

Dr Aloysius Wehr  
e-mail: aloysius.wehr@nav.uni-stuttgart.de