

Andrzej BORKOWSKI¹
Piotr GOŁUCH²
Marian MOKWA³
Przemysław TYMKÓW⁴

WYKORZYSTANIE LOTNICZEGO SKANINGU LASEROWEGO DO BUDOWY NUMERYCZNEGO MODELU TERENU DOLINY RZEKI WIDAWY⁵

1. Wprowadzenie

Numeryczne Modele Terenu (NMT) wykorzystywane są coraz częściej w procesie modelowania hydrodynamicznego, na przykład do określania hydraulicznych cech doliny rzeki [1] czy symulacji przepływu wód wielkich [2]. Dane do budowy tego typu modeli mogą być pozyskiwane tradycyjnie metodami geodezyjnymi, fotogrametrycznymi (teledetekcyjnymi) bądź na podstawie digitalizacji istniejących map.

Z drugiej strony, NMT budowane dla potrzeb modelowania hydrodynamicznego obejmujące doliny rzek i ich bezpośrednie otoczenie powinny charakteryzować się dużą dokładnością oraz szczegółowością odwzorowania ukształtowania terenu. Dotyczy to zwłaszcza takich elementów ukształtowania terenu jak skarpy i obwałowania. Inwentaryzacja tego typu elementów z niedostateczną szczegółowością i dokładnością geometryczną lub co gorsze ich pominięcie w NMT prowadzi do zafałszowania wyników modelowania hydrodynamicznego, co w sytuacji zagrożenia powodziowego może mieć katastrofalne skutki.

Zbudowanie NMT posiadającego wymienione cechy jest praktycznie niemożliwe z wykorzystaniem tradycyjnych metod pozyskiwania danych. Istniejące mapy nie posiadają bowiem zarówno wymaganej szczegółowości jak i powierzchniowej dokładności geometrycznej, zwłaszcza w zakresie treści wysokościowej. Dokładność określenia wysokości w oparciu o zdjęcia lotnicze jest również na ogół niewystarczająca. Ponadto

¹ Dr hab. inż., Instytut Geodezji i Geoinformatyki Akademii Rolniczej we Wrocławiu

² Dr inż., Instytut Geodezji i Geoinformatyki Akademii Rolniczej we Wrocławiu

³ Dr hab. inż. prof. nadzw., Instytut Inżynierii Środowiska Akademii Rolniczej we Wrocławiu

⁴ Mgr. inż., Instytut Inżynierii Środowiska Akademii Rolniczej we Wrocławiu

⁵ Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2005-2007 jako projekt badawczy nr 4T12E0172.

doliny rzek bądź tereny zalewowe, to nierzadko obszary zalesione bądź zakrzaczone. Ważne elementy ukształtowania terenu, typu skarpy czy obwałowania są na takich obszarach niejako ukryte, pod koronami drzew, dla pasywnego sensora (wykorzystującego naturalne światło odbite) jakim są zdjęcia fotogrametryczne. Metody geodezyjne bezpośredniego pomiaru terenowego (tachimetria) mogą zagwarantować zarówno wymaganą dokładność jaki i szczegółowość, jednak w terenach zalesionych są również trudne do zastosowania, a ponadto, ze względu na wysokie koszty, ich wykorzystanie ogranicza się tylko do niewielkich obszarów.

Przedstawione ograniczenia i problemy związane z pozyskiwaniem informacji dla NMT legły u podstaw rozwoju nowej technologii pozyskiwania danych – technologii lotniczego skaningu laserowego. Technologia ta osiągnęła w ostatnich latach zdolność operacyjną i zrewolucjonizowała proces pozyskiwania informacji o topograficznej powierzchni terenu, zwłaszcza na obszarach zalesionych i innych trudno dostępnych. Technologia ta, w przeciwieństwie do klasycznej fotogrametrii, wykorzystuje aktywny sensor w postaci promienia laserowego, za pomocą którego mierzona jest odległość od umieszczonego na pokładzie samolotu źródła lasera do powierzchni terenu, bądź obiektu, od którego następuje odbicie promienia laserowego. Tak zwany współczynnik penetracji w terenach zalesionych waha się od 30% do 70%, zależnie od rodzaju lasu i zwartości zadrzewienia. Oznacza to, że minimum 30% zarejestrowanych punktów stanowią odbicia lasera od powierzchni terenu; pozostałe są to odbicia od koron drzew. Biorąc pod uwagę fakt, że rozdzielczość tej technologii jest na poziomie jednego bądź kilku punktów na metr kwadratowy powierzchni, uzyskujemy wystarczająco gęstą informację punktową o ukształtowaniu terenu, nawet w terenach leśnych. Ponadto odbicia od koron drzew, budynków itp. stanowią cenną informację o pokryciu terenu i pozwalają na stworzenie numerycznego modelu pokrycia terenu (NMPT). Model taki jest bardzo przydatny do modelowania hydrodynamicznego, zawiera bowiem informację o przestrzennym rozmieszczeniu różnych przeszkód mających wpływ na rozprzestrzenianie się fali powodziowej.

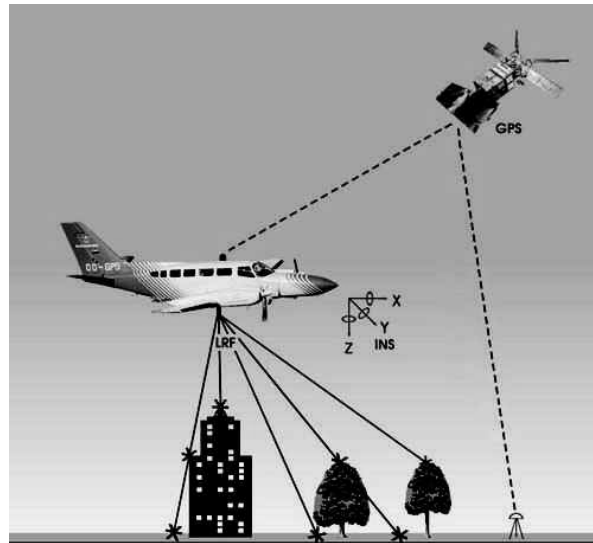
Lotniczy skaningu laserowy został wykonany, po raz pierwszy w Polsce, dla 20 km uściowego odcinka rzeki Widawy we współpracy z Instytutem Nawigacji Uniwersytetu w Stutgardzie za pomocą skonstruowanego tam prototypowego skanera ScaLars. Skaningu został wykonany w celu zbudowania precyzyjnego NMT (NMPT) oraz wykonania modelowania hydrodynamicznego. W pracy przedstawiono wstępne wyniki oraz doświadczenia związane z realizacją projektu. Sposób wykorzystania tych wyników do modelowania przedstawiono w pracy [3].

2. Lotniczy Skaningu Laserowy

Lotniczy skaningu laserowy jest zaawansowaną technologią pozyskiwania danych integrującą w sobie trzy nowoczesne techniki pomiarowe: GPS (Global Positioning System), INS (Inertial Navigation System) i laserowy pomiar odległości LRF (Laser Rangefinder). Współdziałanie tych technik przedstawiono szkiecowo na rysunku 1.

Umieszczone na pokładzie samolotu urządzenie laserowe wysyła, pod różnymi kątami, na ogół prostopadle względem kierunku lotu, impulsy w kierunku ziemi. Na podstawie czasu przebiegu i powrotu sygnału określana jest odległość do powierzchni ziemi bądź obiektu od którego nastąpiło odbicie sygnału. Położenie samolotu w przestrzeni określane jest za pomocą systemu GPS w trybie różnicowym pomiaru (DGPS). Oznacza to, że antena i odbiornik GPS muszą być umieszczone na pokładzie samolotu i na co najmniej jednym punkcie stałym na powierzchni ziemi. Orientację samolotu w przestrzeni, względem układu

zewnętrznego, wyznacza system INS, poprzez pomiar trzech kątów: podniesienia, przechyłu i obrotu samolotu. Cały system określa zatem położenie punktów w przestrzennym układzie biegunowym, w którym kąt i odległość do punktów mierzone są za pomocą skanera laserowego. Za pomocą GPS wyznaczane jest, w interwałach jednosekundowych, położenie początku układu biegunowego, a jego ciągle zmieniającą się orientację wyznacza INS.



Rys. 1. Komponenty lotniczego skaningu laserowego (źródło:[4])

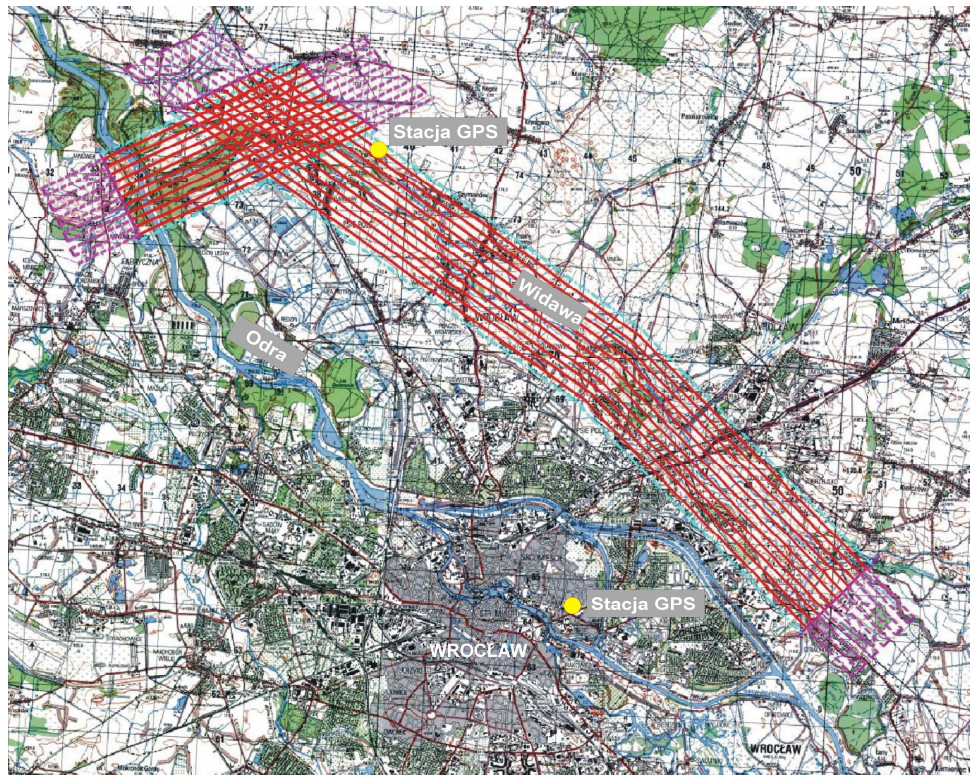
Tablica 1. Podstawowe parametry systemu ScaLars

Moc lasera	0,8 W
Długość fali	810 nm (bliska podczerwień)
Średnica plamki na wyjściu	5 cm
Częstotliwości pomiaru (CW)	1 MHz, 10 MHz
Zasięg pomiaru	750 m
Dokładność pomiaru (H=700m)	0,12 m
Metoda odchylenia wiązki	lustro nutacyjne (Palmer Scan)
Kąt odchylenia wiązki	
- w kierunku lotu	$\pm 7,6^\circ$
- prostopadle do kierunku lotu	$\pm 13,6^\circ$

Po odpowiednim opracowaniu danych z tych trzech systemów otrzymuje się współrzędne punktów w układzie kartezjańskim WGS84. Znajomość współrzędnych punktu naziemnego, na którym ustawiona jest antena odbiornika GPS oraz znajomość wysokości geoidy na obszarze opracowania pozwala wyznaczyć współrzędne w obowiązującym na danym obszarze układzie współrzędnych i systemie wysokości.

W prezentowanym projekcie wykorzystano prototypowy skaner ScaLars II zbudowany w Instytucie Nawigacji Uniwersytetu w Stutgardzie [5]. Skaner ten wykorzystuje falę ciągłą (CW), a wiązka odchylana jest za pomocą rotującego lustra. Złożenie rotacji lustra i ruch samolotu daje rozkład punktów pomiarowych wzdłuż przesuwającej się po obszarze

skanowania elipsy. System rejestruje również intensywność odbicia promienia. Podstawowe parametry skanera zestawiono w tabeli 1. Do rejestracji sygnału GPS i INS wykorzystano system Applanix.



Rys. 2. Mapa obszaru opracowania z projektowanymi osiami nalotu

3. Projekt WIDAWA

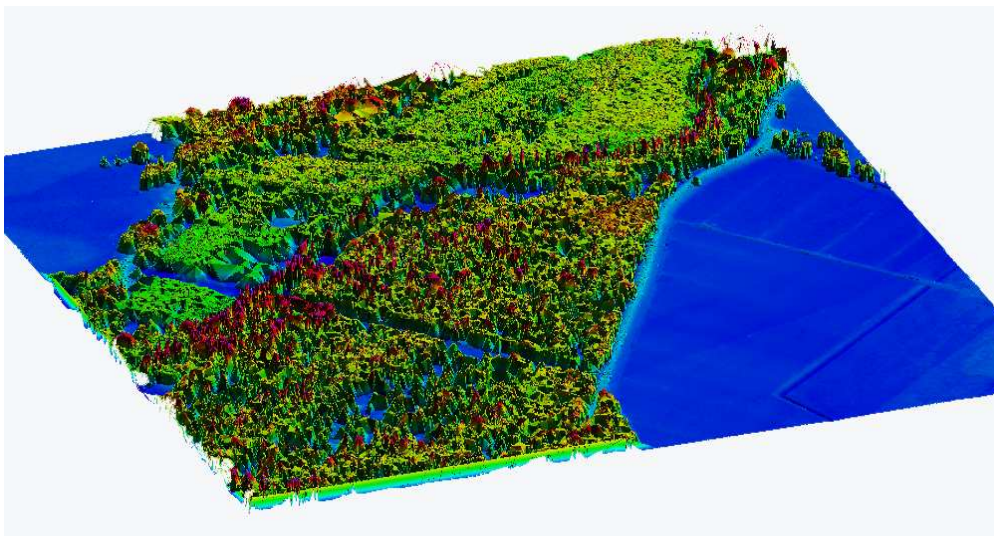
System ScaLars II, zamontowany na pokładzie samolotu AN-2, będącego własnością Aeroklubu Wrocław w Szymanowie, wykorzystano do wykonania lotniczego skaningu doliny rzeki Widawy. Do rejestracji sygnału GPS wykorzystano odbiorniki Trimble 4700.

Obszar opracowania, obejmujący 20-kilometrowy ujściowy odcinek rzeki Widawy, pokazano na rysunku 2. Szerokość obszaru opracowania wynosi około 2 km. Na rysunku 2 jest to obszar pokryty liniami równoległymi; są to projektowane linie nalotu. Nalot wykonano przy następujących parametrach projektowych:

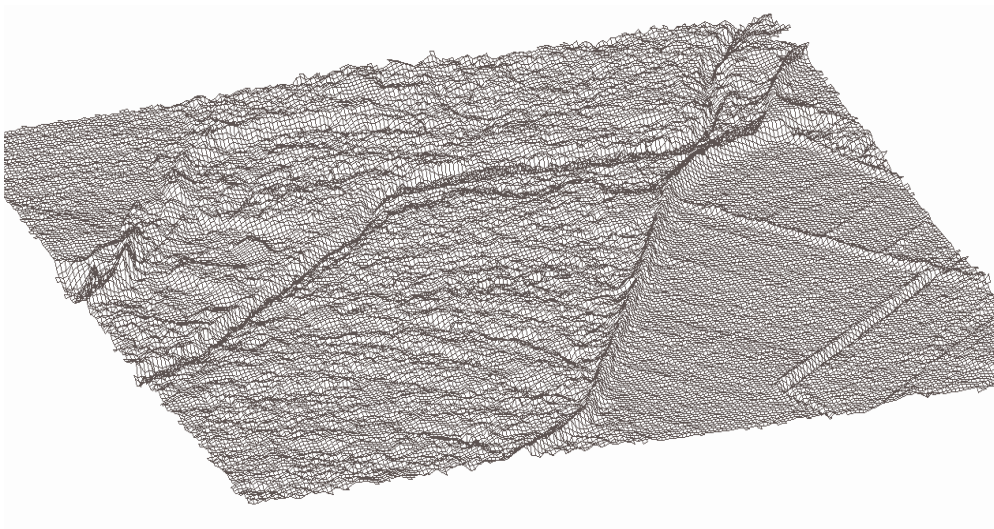
- prędkość lotu: 150 km/h,
- wysokość lotu: 550 m,
- szerokość pasa skanowania: 280 m,
- odstęp pomiędzy osiami lotu: 190 m.

Zarejestrowano średnio 2 do 3 punktów na m^2 , a odległości pomiędzy sąsiednimi punktami w poszczególnych skanach wynoszą około 0,6 m. Taka rozdzielczość skanowania

jest wystarczająca do zarejestrowania odpowiedniej liczby punktów na wałach. W oparciu o informacje punktowe będą następnie modelowane obwałowania z wykorzystaniem metod zaproponowanych w pracach [6], [7]. W oparciu o informację punktową $\{x,y,h\}$ danych skaningu, modelowany będzie, w szczególności, przebieg linii krawędziowych.



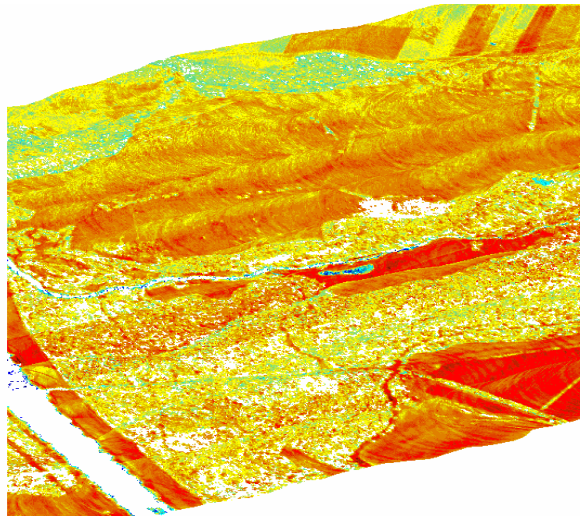
Rys. 3. Numeryczny model pokrycia terenu doliny Widawy (fragment)



Rys. 4. Numeryczny model terenu doliny Widawy (fragment)

Po odpowiednim przetworzeniu danych pomiarowych i eliminacji błędnych odbić, otrzymano zbiór punktów zawierających punkty będące obiciami od powierzchni ziemi oraz odbiciami od budynków czy roślinności. Na tej podstawie wyinterpolowano NMPT, którego fragment przedstawiono na rysunku 3.

Stosując odpowiednie algorytmy automatycznej filtracji, wyeliminowano następnie punkty nie będące odbiciami od powierzchni terenu. Na podstawie punktów pozostałych stworzony został NMT, którego fragment przedstawiono na rysunku 4. Modele te wykorzystano następnie w procesie estymacji współczynników oporu przepływu wód.



Rys. 5. Obraz intensywności odbicia



Rys. 6. Przekrój pionowy punktów pomiarowych na obszarze zalesionym

Oprócz informacji geometrycznej w postaci współrzędnych punktów, dane skaningu zawierają również informację o intensywności odbicia promienia laserowego. Wartość ta zależy od pokrycia terenu i może być wykorzystana, jako jedna z cech, w procesie automatycznej klasyfikacji obszarów i estymacji współczynników oporu. Na rysunku 5 przedstawiono przykładowy obraz intensywności odbicia. Na podstawie intensywności można łatwo wyróżnić na przykład obszary zalesione, wskazać przebieg rzeki Widawy i wałów przeciwpowodziowych. W prawym górnym rogu widoczna jest różnorodna struktura upraw na gruntach ornych. Jasny pas w lewym dolnym rogu wyznacza przebieg Odry. Brak jest tutaj punktów pomiarowych, ponieważ woda absorbuje promień laserowy (bliska podczerwień). Również inne obiekty typu budynki, drogi, nasypy kolejowe widoczne są wyraźnie w obrazie intensywności.

Na rysunku 6 pokazany typowy przekrój pionowy danych skaningu laserowego na terenach leśnych. Na rysunku tym widać na dole linię odbić od powierzchni terenu oraz wyżej linię odbić od koron drzew. Pomiedzy tymi dwoma liniami widoczna jest wyraźna przerwa, w której pojawiają się tylko pojedyncze punkty. Na podstawie takiego profilu można zatem określić przeciętną wysokość pierwszego poziomu gałęzi ponad powierzchnią ziemi. Informacja ta jest przydatna dla określenia współczynników oporu. Ponadto w profilu

pionowym widoczna jest również zmiana zwartości zadrzewienia. Zmianę tę można oszacować na podstawie liczby odbić lasera (liczby punktów) na poszczególnych poziomach. W literaturze przedmiotu można również znaleźć prace, w których podejmowane są próby modelowania koron drzew na podstawie danych skaningu [8].

Na koniec trzeba jeszcze postawić pytanie o dokładność pozyskanych danych skaningu laserowego. Szczególnie ważna jest dokładność określenia wysokości. Dokładność tę określono przez porównanie wysokości punktów charakterystycznych, na przykład armatury naziemnej urządzeń podziemnych, z odpowiednimi punktami skaningu laserowego. Wysokości punktów charakterystycznych podane są na mapach zasadniczych 1:500 z dokładnością jednego centymetra. Mogą być traktowane zatem jako bezbłędne. Obliczony na podstawie kilkudziesięciu punktów z różnych obszarów błąd standardowy danych skaningu wyniósł $\pm 0,20$ m. Jest to dokładność wystarczająca dla potrzeb modelowania hydrodynamicznego.

4. Podsumowanie

Lotniczy skaningu laserowy jest szybką i dokładną metodą pozyskiwania szczegółowej informacji punktowej o skanowanej powierzchni. Metoda ta jest niemal niezastąpiona w trudnodostępnych terenach zalesionych. W kontekście modelowania hydrodynamicznego metoda ta jest szczególnie atrakcyjna ponieważ:

- pozwala szybko i stosunkowo tanio (koszt porównywalny z metodami fotogrametrycznymi) zbudować NMT o wysokiej dokładności i szczegółowości,
- zarejestrowane dane zawierają jednocześnie informację o pokryciu terenu,
- wysoka rozdzielczość skaningu daje możliwość modelowania, w postaci wektorowej, linii krawędziowych obwałowań oraz skarp na podstawie informacji punktowej $\{x,y,h\}$,
- rejestrowana intensywność odbicia daje podstawy do automatycznej klasyfikacji obszarów dla potrzeb obliczenia współczynników szorstkości terenu,
- informacja zawarta w przekrojach pionowych zbioru danych skaningu laserowego może być przydatna w modelowaniu przepływu wód wielkich.

Ze względu na słabe właściwości refleksyjne obszarów o bardzo dużej wilgotności, pomiary skaningu laserowego dolin rzecznych najkorzystniej jest wykonywać w okresie niskich stanów wód. Zbiory danych skaningu zawierają bardzo dużą liczbę rekordów danych, rzędu 10^6 . Jest to liczba stanowiąca wciąż wyzwanie dla typowych komputerów.

Literatura

- [1] GOŁUCH P., Wykorzystanie numerycznego modelu terenu i ortofotomapy do określania hydraulicznych cech doliny rzeki. *Problemy Hydrotechniki – Współczesne podstawy planowania i projektowania w inżynierii i gospodarce wodnej*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. 2003, s. 22-35.
- [2] KAŁUŻA T., Numeryczna 2-d symulacja warunków przepływu wód wielkich na odcinku Wisły Środkowej w okolicy Puław. *Problemy Hydrotechniki – Współczesne podstawy planowania i projektowania w inżynierii i gospodarce wodnej*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. 2003, s. 36-48.
- [3]. TYMKÓW P., MOKWA M, BORKOWSKI A, GOŁUCH P., Automatyczna estymacja wartości współczynników oporów przepływu wód w dolinach rzek z wykorzystaniem danych skaningu laserowego oraz zdjęć lotniczych. *Problemy Hydrotechniki* (w tym zeszycie).

- [4] KURCZYŃSKI Z., DTM inaczej. *Geodeta - Magazyn Geoinformacyjny*, 1999, nr 2(45), s. 5-10.
- [5] WEHR A., LOHR U., *Airborne laser scanning - an introduction and overview*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 (1999), pp. 68-82
- [6] BORKOWSKI A., *Modellierung von Oberflächen mit Diskontinuitäten*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr 575, München 2004.
- [7] BORKOWSKI A., KELLER W., *Global and local method for tracking the intersection curve between two surfaces*. Journal of Geodesy (2005)79 pp. 1-10
- [8] GORTE B.G.H., PFEIFER N., *Structuring laser-scanned trees using 3D mathematical morphology*. IAPRS, vol 35, part B5, 2004, pp. 929-933.

USE OF THE AIRBORNE LASER SCANNING FOR GENERATING DIGITAL TERRAIN MODEL OF THE WIDAWA RIVER VALLEY

Summary

Airborne laser scanning is a fast and precise method of collecting high-accuracy information about scanning surface. In the project, this method has been used for generation DTM and DSM for 20-km long Widawa river valley estuary section. The generated models will be used for the hydrodynamic modelling. Surveys were performed by using prototype scanner ScaLars supported with INS Applanix and GPS systems. Measurement density was about 2 to 3 points per square meter and elevation accuracy was received approximately ± 0.20 m.

In the paper preliminary results and experiences connected with realization of project were presented. Additional products of scanning were also shown, as well as a way of using then for estimation of resistance parameters of high-water flow.