

**WYKORZYSTANIE WSKAŹNIKA INTENSYWNOŚCI ODBICIA
W PROCESIE POZYSKIWANIA SIECI DROGOWEJ
Z DANYCH LIDAROWYCH**

**USE OF SIGNAL INTENSITY INDICES IN THE PROCESS OF EXTRACTING
A ROAD NETWORK FROM LIDAR DATA**

Artur Warchol

Studium Doktoranckie przy Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska,
Akademia Górniczo-Hutnicza

SŁOWA KLUCZOWE: LIDAR, intensywność, sieć drogowa, przetwarzanie danych

STRESZCZENIE: W niniejszej pracy przedstawiono technologię wykorzystania współczynnika intensywności odbicia - jednego z parametrów charakteryzujących odbicie promienia lasera w punkcie o współrzędnych (X, Y, Z). Współczynnik ten został użyty w celu wykrycia sieci dróg bez wspomagania danymi pochodzącymi z innych sensorów. Poprzez różnie dobrane przedziały wartości odpowiadające odbiciu od nawierzchni dróg wyodrębniono z chmury punktów sieć drogową (w postaci zbioru punktów), a następnie automatycznie wygenerowano jej granicę. Uzyskane wyniki zestawiono z pomiarem bezpośrednim GPS RTK pod względem ich lokalizacji poziomej, a następnie sprawdzono stopień pokrycia powierzchni drogi wygenerowanej w oparciu o intensywność sygnału lidarowego z utworzoną w oparciu o pomiar GPS.

1. WPROWADZENIE

Lotniczy skaniny laserowy (ang. *Airborne Laser Scanning* – ALS) jest w ostatnich latach przedmiotem zainteresowań i badań wielu naukowców. Pomimo to nadal jeszcze pozostaje nierozwiązanych wiele problemów związanych z tą techniką pomiarową. Wśród niewątpliwych zalet ALS wskazać należy bardzo dużą szybkość pozyskiwania danych, większą niezależność od warunków pogodowych niż przy projektach fotogrametrycznych (można skanować w dzień pochmurny lub nawet w nocy bo jest to system aktywny) oraz względnie wysoką precyzję (Gołuch *et al.*, 2007). Ilość pozyskanych z jednego przelotu danych, która bardzo realistycznie odwzorowuje świat rzeczywisty stanowi spore wyzwanie dla operatora modelującego zarejestrowany obszar w środowiskach

typu CAD. Niezależnie od typu skanera (fazowy lub impulsowy) oprócz trzech współrzędnych (X,Y,Z) każdego pozyskanego punktu pomiarowego zapisywana jest wartość wskaźnika intensywności odbicia, który m.in. zależy od typu/stanu pokrycia terenu. Intensywność pozwala więc na uzyskanie dodatkowej informacji np. o stopniu zużycia lub uszkodzenia elementów konstrukcyjnych obiektów drogowych (Kędzierski *et al.*, 2008a), o materiale z którego wykonany jest mierzony obiekt (Kędzierski *et al.*, 2008b) bądź też o typie pokrycia terenu (Wehr, Lohr, 1999). Badania z zakresu ekstrakcji sieci drogowej prowadzone były przy użyciu wyłącznie danych lidarowych (Clode *et al.*, 2007), jak również danych ALS wspomaganych wysokorozdzielczymi zdjęciami satelitarnymi (Tiwari *et al.*, 2009). Ze względu na wspomnianą wcześniej ogromną ilość danych najlepiej gdyby obróbka danych przebiegała z ograniczonym udziałem operatora. Niestety różnorodność form terenowych i obiektów odwzorowywanej rzeczywistości oraz spora ilość błędów przypadkowych znacznie utrudnia automatyzację. Prace z zakresu poszukiwań skutecznej metodologii doboru przedziału intensywności reprezentującego sieć drogową przedstawiono w dalszej części artykułu.

2. DANE ŹRÓDŁOWE ORAZ OBSZAR BADAŃ

Obszar badań obejmował teren Wspólnotowego Centrum Badawczego Unii Europejskiej (JRC – *Joint Research Centre*, Ispra, Włochy) wraz z terenem przyległym o powierzchni ok. 320 ha (Rys. 1). Z istniejącej na tym obszarze sieci drogowej wybrano cztery pola testowe (P1, P2, P3, P4), na których w drugim etapie badań przeprowadzono analizę położenia fragmentów dróg wygenerowanych przy użyciu współczynnika intensywności ALS względem odpowiadających im fragmentom dróg powstałym z pomiarów GPS-RTK.



Rys. 1. Fragment ortofotomapy badanego obszaru (oryginał w kolorze).



Rys. 2. Chmura punktów ALS wyświetlana wg wartości parametru intensywności odbicia.

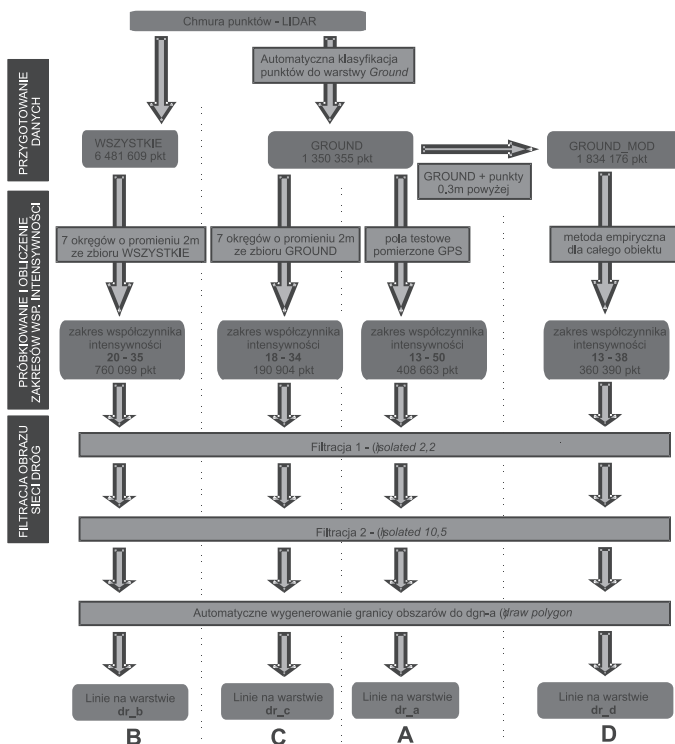
Całość terenu badań została pokryta nalotem lidarowym przeprowadzonym w roku 2005. Pliki w formacie ASCII zawierały współrzędne (X,Y,Z) punktów pierwszego i ostatniego odbicia oraz wartość intensywności odbitego sygnału (Rys. 2). Średnia gęstość punktów pomiarowych wynosiła ok. 2 pkt/m². Dla obszaru badań istniała także barwna ortofotomapa wykonana lotniczą kamerą cyfrową Leica ADS40, która była wykorzystywana jedynie w celach wizualizacyjnych i poglądowych.

Dzięki uprzejmości A. Simy (JRC) pozyskano, w celach kontrolnych, fragmenty dróg pomierzone w technologii GPS w trybie RTK w nawiązaniu do stacji referencyjnej JRC. Rejestracja przy pomocy odbiornika Trimble 5700 odbywała się przy spełnieniu warunków progowych dokładności, które ustalono na 0.02 m w poziomie oraz 0.03 m w pionie.

3. METODYKA BADAŃ

Na rysunku 3 przedstawiono schemat pierwszego etapu obróbki danych. Ze względu na różny dobór danych wejściowych oraz różną szerokość przedziałów intensywności wyodrębniono cztery ścieżki przetwarzania danych, a w konsekwencji cztery zbiory danych testowych. Każdy ze zbiorów oznaczono odpowiednio literami: A, B, C i D. Przetwarzanie danych wykonywano w środowisku MicroStation v8 2004 firmy Bentley wraz z dodatkową aplikacją TerraScan firmy Terrasolid.

Zbiory danych były przygotowywane w taki sposób, aby sprawdzić maksymalną zawartość informacyjną danych przetworzonych i nieprzetworzonych. Zbiór B potrak-



Rys. 3. Schemat pierwszego etapu przetwarzania danych – wyodrębnienie zbiorów danych A, B, C, D.

towano jako referencyjny, z którego usunięto jedynie błędy grube – punkty leżące kilkadziesiąt metrów poniżej lub powyżej aproksymowanej powierzchni gruntu. Zawsze podczas pracy na chmurze punktów lidarowych wyodrębnia się punkty terenowe do generowania NMT (Numerycznego Modelu Terenu), NMPT (Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu) oraz pomocniczo do pozostałych klasyfikacji, dlatego też pozostałe zbiory (A, C oraz D) zostały stworzone na podstawie wygenerowanej warstwy *Ground* (Hejmanowska, *et al.*, 2008).

Z całej chmury punktów ALS (ok. 6.5 mln) została automatycznie wyodrębniona warstwa *Ground* opierając się na algorytmie aktywnego modelu TIN (Axelsson, 2000), w której znalazło się ok. 1.3 mln punktów. Klasyfikację przeprowadzono przy użyciu następujących parametrów: maksymalny rozmiar budynku – 60 m, maksymalny kąt nachylenia terenu – 88°, kąt iteracyjny – 6°, odległość iteracyjna 1.4 m. Zastosowano również opcję redukcji kąta iteracyjnego przy długościach boków trójkąta mniejszych niż 5 m. Na tym etapie przygotowania danych, atrybutem decydującym przy klasyfikacji była wysokość punktów. W dalszej kolejności podczas analiz wykorzystywano tylko wartość współczynnika intensywności odbicia. Do próbkowania użyto siedmiu okręgów o promieniu 2 m. Wartość 2 m ustalono na drodze dedukcji – większy promień mógłby powodować,

że zwłaszcza przy wąskich drogach, oprócz nawierzchni jezdni do próbki mogłyby trafić punkty sąsiadujące np. trawa. Kształt obszaru próbkowania w postaci okręgów wybrano ze względu na to, iż niezależnie od azymutu osi obszaru testowego (przy promieniu 2 m) obszar próbkowania zawsze będzie leżał wewnątrz pola testowego. Pola testowe GPS to prostokąty oparte na pomierzonych punktach krawędzi dróg. Dla obszarów próbkowania obliczono charakteryzujące je parametry intensywności i zestawiono w tabeli 1. Na podstawie tych parametrów ustalono wartości przedziałów dla każdej z metod.

3.1. Wydzielenie i charakterystyka zbioru A

W oparciu o pomierzone punkty GPS (krawędzie dróg) wyznaczono obszary testowe. Po zrzutowaniu warstwy *Ground* na obwodnice pól testowych wybrano część wspólną obydwu zbiorów tj. obszary zawierające punkty lidarowe, które leżały w granicach obszarów testowych. W ten sposób powstał zbiór (cztery pola testowe zawierające punkty lidarowe), dla którego obliczono charakteryzujące go parametry intensywności: wartość minimalną (min), maksymalną (maks), wartość średnią (\bar{x}), odchylenie standardowe (σ) oraz utworzono przedział $\langle \bar{x} - \sigma, \bar{x} + \sigma \rangle$ w zaokrągleniu do najbliższych wartości całkowitych. Wartości parametrów dla zbiorów A, B, C i D zestawiono w tabeli 1.

3.2. Wydzielenie i charakterystyka zbioru B

Zbiór ten podlegał najmniejszej ilości przetworzeń bowiem analizując przestrzenny rozkład punktów chmury ALS wizualizowanej wg wartości współczynnika intensywności (Rys. 2) wyznaczono siedem obszarów kołowych o promieniu 2 m, które z bardzo wysokim prawdopodobieństwem są powierzchnią drogi. Dla znajdujących się w nich punktów pomiarowych obliczono podstawowe statystyki jak dla zbioru A i zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Zestawienie parametrów charakteryzujących zbiorów wg intensywności odbicia.

	Zbiór A	Zbiór B	Zbiór C	Zbiór D
Min	1	12	12	-
Maks	129	55	42	-
Średnia (\bar{x})	31.4	27.3	25.9	-
Odch. stand. (σ)	18.2	7.2	7.5	-
Przedział	13÷50	20÷35	18÷34	13÷38
Ilość punktów	408 663	760 099	190 904	360 390

3.3. Wydzielenie i charakterystyka zbioru C

Początek etapu przygotowania przebiegał podobnie jak w przypadku zbioru A. Z całej chmury ALS wyodrębniono klasę *Ground*, po czym wczytano jej punkty do siedmiu obszarów kołowych (poligonów dgn) o promieniu 2 m w miejscach, które można

było uznać za powierzchnię drogi. Dla powstałego zbioru obliczono parametry charakterystyczne (Tab. 1).

3.4. Wydzielenie i charakterystyka zbioru D

Zbiór D na etapie przygotowania wymagał największej ilości pracy. Po wyodrębnieniu z chmury punktów ALS klasy reprezentującej teren przeprowadzono dodatkową klasyfikację selekcyjną punkty znajdujące się do wysokości 0.3 m ponad klasą *Ground*. Wartość 0.3 m przyjęto na podstawie wcześniejszych badań (Hejmanowska, Warchol, 2009). Następnie połączono klasy tworząc zbiór GROUND_MOD. Kolejnym krokiem było zastosowanie klasyfikacji wg wartości współczynnika intensywności (szerokość przedziału – 1), po czym na podstawie analizy wizualnej wybrano warstwy, które najlepiej odpowiadały kształtowi sieci drogowej.

Wszystkie zbiory poddano jednakowej filtracji dwuetapowej, której parametry dobrano empirycznie polegając na ocenie wizualnej uzyskanych efektów (Rys. 4 i 5). Obydwa etapy polegały na wyodrębnieniu punktów izolowanych (*classify isolated points*). Funkcja ta posiada dwa parametry: pierwszy parametr to liczba punktów, jaka musi być co najmniej wyszukana w podanej odległości, aby punkt analizowany nie był zaznaczany, natomiast drugi parametr to promień sfery w metrach, jaka ma być przeszukiwana. Dla każdego więc punktu sprawdzany jest następujący warunek: jeśli mniej niż dana liczba punktów w określonym promieniu to wybierz punkt. Pierwszy etap klasyfikacji został przeprowadzony z ustawieniami (parametr 1 = 2, parametr 2 = 2) natomiast drugi przy parametrach (10.5).

Po przefiltrowaniu wszystkich zbiorów następowało obrysowanie chmur punktów przy użyciu funkcji *Draw polygon*. Parametry dostępne w tym module powodują większe bądź mniejsze wygładzenie krawędzi poligonu, a tworzonym obszarom można zadać wielkość maksymalną. Efektem końcowym są obszary zamknięte wykonane linią typu *smart line* na wybranej warstwie pliku dgn (Rys. 6).



Rys. 4. Zbiór D – wybrany fragment chmury punktów przed filtracją.



Rys. 5. Zbiór D – wybrany fragment chmury punktów po filtracji.



Rys. 6. Zbiór D – wybrany fragment po wygenerowaniu granic.

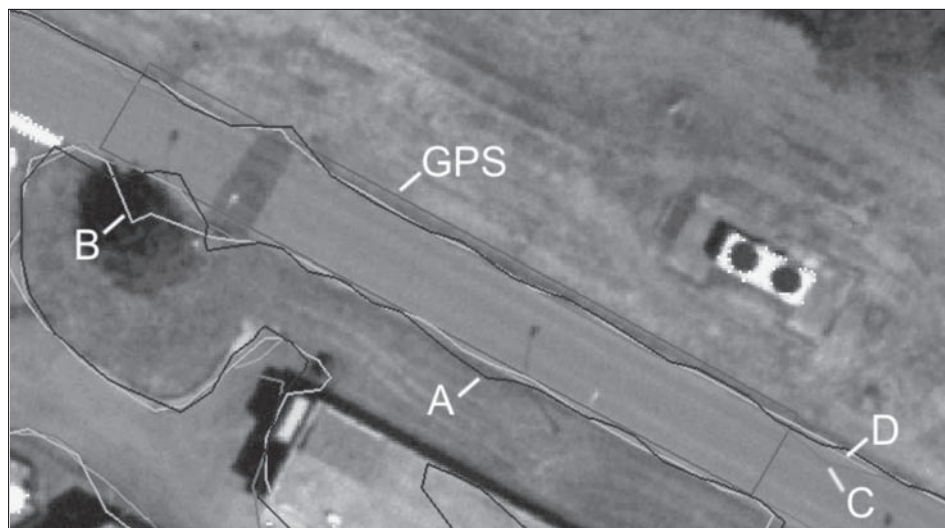
4. WYNIKI BADAŃ

Sprawdzenia efektywności poszczególnych ścieżek postępowania dokonano na czterech polach testowych zlokalizowanych na drogach asfaltowych, których krawędzie zostały pomierzone przy użyciu technologii GPS-RTK.

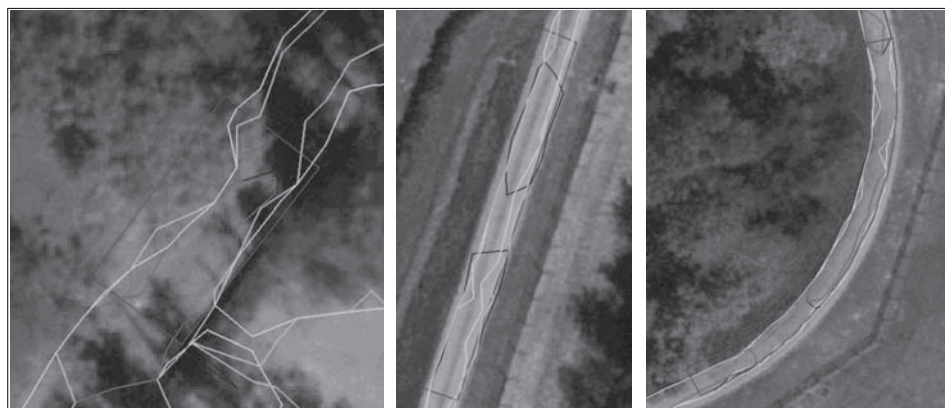
Pola testowe (P1, P2, P3 i P4) zostały tak rozmieszczone, aby mogły zawierać jak najszersze spektrum występujących przypadków (różny kształt pól testowych, różną dostępność promienia lasera do nawierzchni drogi). Wszystkie obszary to fragmenty dróg,

posiadają więc wydłużony kształt oparty na punktach GPS (od 4 do 10). Stosunki boków dla P1 i P3 wynosiły ok. 1:10, w przypadku P2 ok. 1:2 natomiast P4 zlokalizowany był na zakręcie drogi i posiadał stosunek ok. 1:20. Wydłużenie P1 skierowane jest prawie zgodnie do kierunku lotu samolotu natomiast pozostałe pola są skierowane prawie prostopadle.

Lokalizacja pól testowych została też starannie wybrana pod względem otoczenia. W przypadku pól P1 i P3 otoczenie stanowi niska trawa, w przypadku pola P2 - drzewa po obydwu stronach wąwozu, w którym znajduje się droga, natomiast pole P4 osłonięte jest zwartym lasem od strony zachodniej (Rys. 7 i Rys. 8).



Rys. 7. Pole P1 – liniami oznaczono granice wygenerowane poszczególnymi metodami.



Rys. 8. Pole P2

Pole P3

Pole P4

Na każdym polu testowym dokonano porównania poszczególnych metod w dwóch aspektach – pod względem sprawdzenia zgodności kartowania oraz pod względem liczby punktów wykorzystanych do wygenerowania obszaru drogi. Za najlepszą metodę należy uznać tą, która posiada największy procent pokrycia oraz najmniejszą liczbę punktów. Wyniki zarówno w ujęciu ilościowym jak i procentowym zestawiono (osobno dla każdego pola testowego) w tabelach, odpowiednio: P1 – tabela 2, P2 – tabela 3, P3 – tabela 4 oraz P4 – tabela 5. W pierwszej kolumnie literami A, B, C i D oznaczono zbiory – metody wyboru wartości granicznych przedziału. W drugiej kolumnie znajduje się pole powierzchni w m², w trzeciej stosunek pola powierzchni z kolumny drugiej do pola powierzchni pomierzonego GPS, w czwartej kolumnie znajduje się liczba punktów ALS użytych do wygenerowania obszaru drogi, natomiast w ostatniej kolumnie w ujęciu procentowym przedstawiony jest stosunek liczby punktów z kolumny czwartej do wszystkich punktów ALS znajdujących się w polu testowym.

W tabelach 2 do 5 na szaro wyróżniono te przypadki, w których stosunek pokrycia powierzchniowego do liczby używanych punktów jest satysfakcjonujący. Za taki

Tab. 2. Zestawienie pokrycia powierzchniowego oraz liczby punktów dla pola P1.

P1	Pole powierzchni 356.99 m ² - GPS		Liczba punktów LIDAR wszystkich w P1 - 1022	
	[m ²]	%	pkt	%
A	309.34	87	261	26
B	310.40	87	831	81
C	299.84	84	237	23
D	308.12	86	370	36

Tab. 3. Zestawienie pokrycia powierzchniowego oraz liczba punktów dla pola P2.

P2	Pole powierzchni 119.18 m ² - GPS		Liczba punktów LIDAR wszystkich w P2 - 187	
	[m ²]	%	pkt	%
A	56.26	47	38	20
B	72.17	61	115	61
C	42.57	36	34	18
D	70.51	59	50	27

Tab. 4. Zestawienie pokrycia powierzchniowego oraz liczby punktów dla pola P3.

P3	Pole powierzchni 164.57 m ² - GPS		Liczba punktów LIDAR wszystkich w P3 - 251	
	[m ²]	%	pkt	%
A	91.89	56	71	28
B	90.05	55	119	47
C	0.00	0	0	0
D	11.77	7	87	35

Tab. 5. Zestawienie pokrycia powierzchniowego oraz liczby punktów dla pola P4.

P4	Pole powierzchni 224.02 m ² - GPS		Liczba punktów LIDAR wszystkich w P4 - 322	
	[m ²]	%	pkt	%
A	91.98	41	68	21
B	153.65	69	239	74
C	67.51	30	56	17
D	153.41	68	119	37

uznawano kombinację około 50% lub wyższego pokrycia oraz maksymalnie do 40% lub mniejszego wykorzystania punktów.

W polu P3, metoda C, występują zera, ponieważ po zastosowanych filtracjach w obrębie obszaru testowego GPS nie znalazły się żadne punkty z nalotu lidarowego.

5. WNIOSKI

Uzyskane wyniki wskazują na możliwość zastosowania współczynnika intensywności jako bardzo cennego i wiarygodnego źródła informacji w procesie detekcji dróg asfaltowych. Pod względem powierzchniowym uzyskany kształt drogi w najlepszym przypadku stanowi ponad 80% rzeczywistej powierzchni. Niedoszacowanie powierzchni jezdni na poziomie 20% może wydawać się zbyt duże, jednak zabezpiecza ono użytkownika przed popełnieniem błędu zaklasyfikowania punktu, jako powierzchni drogi gdy w rzeczywistości nim nie był. Inną ważną zaletą, którą należy wskazać zwłaszcza przy bardzo dużej liczbie danych uzyskiwanych z pomiarów lidarowych jest redukcja liczby punktów wykorzystywanych do tworzenia obrazu sieci dróg. Niedogodnością na obszarach miejskich jest przerywanie ciągłości obrysu drogi w miejscach pasów dla pieszych, wypełnień fragmentów nawierzchni różnymi rodzajami asfaltu etc. Pomimo tego zastosowanie powyższego generowania obrysu drogi znacznie przyspiesza pracę nad wektoryzacją, gdyż rola operatora sprowadza się do intuicyjnego usuwania zbędnych wierzchołków. Analizując otrzymane wyniki zauważyć można także, iż najbardziej efektywne są metody A (zbiór danych nieprzetworzonych) i D (wygenerowana warstwa *Ground* wraz z punktami do 0.3 m ponad NMT *Ground*). W metodach tych dolną granicę współczynnika intensywności dla punktów „drogowych” ustalono jako 13, natomiast w metodach B i C są to odpowiednio wartości 20 i 18. Górne granice przedziału przyjmują zbliżone wartości dla metod: B – 35, C – 34, D – 38 oraz znacznie większą wartość w metodzie A – 50. Tak więc wnioskować można, iż większość użytecznych informacji o obrazie sieci drogowej znajduje się w przedziale ok. 13÷20. Najmniejsza ilość przetworzeń danych oraz czysto matematyczne podejście w met. B spowodowało utworzenie największego przedziału z największą liczbą punktów. Metoda B jednak na przestrzeni wszystkich pól testowych wykazała się największą stabilnością pokrycia powierzchniowego (87%, 61%, 55% i 69%). Należałoby więc rozważyć możliwość kombinacji wyników różnych metod.

Metoda D natomiast, pomimo najlepszych wyników jest zbyt pracochłonna, aby mogła być stosowana „produkcyjnie”.

6. LITERATURA

Axelsson P., 2000. DEM generation from laser scanner data using adaptative TIN models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIII/4B, Amsterdam.

Clode S., Rottensteiner F., Kootsookos P., Zelniker E., 2007. Detection and Vectorization of Roads from Lidar Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 73, No. 5, s. 517-535.

Gołuch P., Borkowski A., Józków G., 2007. Ocena dokładności danych lotniczego skaningu laserowego systemu SCALARS. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 17, s. 251-260.

Hejmanowska B., Borowiec N., Badurska M., 2008. Przetwarzanie lotniczych danych lidarowych dla potrzeb generowania DSM i DTM. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol.18, s. 151-163.

Hejmanowska B., Warchoła A., 2009. Analiza porównawcza wysokości terenu uzyskanej za pomocą lotniczego skaningu laserowego, pomiaru GPS oraz pomiaru na modelu stereoskopowym z kamery ADS40. *Acta Scientiarum Polonorum s. Geodesia et Descriptio Terrarum*, Wrocław (w druku).

Kędzierski M., Walczykowski P., Fryškowska A., 2008a. Naziemny skaningu laserowy drogowych obiektów inżynierskich. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 18, s. 211-220.

Kędzierski M., Walczykowski P., Fryškowska A., 2008b. Wybrane aspekty opracowania dokumentacji architektonicznej obiektów zabytkowych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 18, s. 221-230.

TerraScan. 2006. User Manual: <http://www.terrasolid.fi>

Tiwari P.S, Pande H., Pandey A.K, 2009. Automatic Urban Road Extraction using Airborne Laser Scanning Altimetry and High Resolution Satellite Data. *Indian Soc. Remote Sens.*, Vol. 37, s. 223-231.

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

USE OF SIGNAL INTENSITY INDICES IN THE PROCESS OF EXTRACTING A ROAD NETWORK FROM LIDAR DATA

KEY WORDS: LIDAR, signal intensity, road, data processing

SUMMARY: The extraction of roads from LIDAR data using signal intensity is presented in this paper. Signal intensity is one of the attributes in LIDAR register points. This coefficient was used to detect the road network without using other sensors. The road network was extracted from point clouds (as a set of points) derived from different ranges of values selected corresponding to reflection from the road, and the boundaries were then automatically generated. The results of this analysis were compared with direct measurement GPS RTK in two respects: horizontal localization and coverage of the road surface - first from intensity signal border generation and second from GPS RTK measurement.

mgr inż. Artur Warchol
awarchol@ar.krakow.pl
telefon: +48 12 6624518
fax: +48 12 6624539