

## **FILTRACJA DANYCH LOTNICZEGO SKANINGU LASEROWEGO METODĄ RUCHOMYCH POWIERZCHNI WIELOMIANOWYCH – WERYFIKACJA METODY**

Andrzej Borkowski, Grzegorz Józków

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

**Streszczenie.** Głównym zagadnieniem procesu opracowania danych lotniczego skaningu laserowego, na potrzeby budowy numerycznych modeli terenu, jest identyfikacja punktów będących odbiciami od powierzchni terenu. W pracy przedstawiono metodę hierarchicznej identyfikacji punktów należących do powierzchni terenu, bazującą na aproksymacji danych ruchomą powierzchnią wielomianową. Parametry wielomianu ruchomego wyznaczone są lokalnie z wykorzystaniem estymacji odpornej metodą M-estymatorów. W procesie estymacji wykorzystano funkcję wagową zależną od odległości oraz asymetryczną funkcję tłumienia. Wykonano szereg testów numerycznych dla rzeczywistych danych lotniczego skaningu laserowego, obejmujących piętnaście zestawów testowych z danymi referencyjnymi w postaci zbiorów z poprawnie sklasyfikowanymi punktami terenu i punktami obiektów. Weryfikacja wyników filtracji polegała na porównaniu wyników automatycznej filtracji ze zbiorami referencyjnymi. W wyniku porównania określono procentowe błędy filtracji automatycznej. Całkowity błąd filtracji kształtował się na poziomie od około 1% do około 12%, w zależności od ukształtowania terenu i jego pokrycia. Stwierdzono ponadto, że wprowadzenie dodatkowej informacji *a priori* w postaci punktów należących do powierzchni terenu, w miejscach krytycznych, np. obwałowania rzek, podnosi dokładność filtracji automatycznej.

**Słowa kluczowe:** lotniczy skaningu laserowy, filtracja, wielomianowa powierzchnia ruchoma, estymacja odporna

### **WSTĘP**

Wraz z rozwojem techniki lotniczego skaningu laserowego dane o powierzchni terenu pozyskiwane są z coraz większą dokładnością i rozdzielczością. W dalszym ciągu jednak najbardziej pracochłonnym jest etap opracowania danych. Głównym zagadnie-

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: Andrzej Borkowski, Instytut Geodezji i Geoinformatyki, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, ul. Grunwaldzka 53, 50-357 Wrocław, e-mail: borkowski@kgf.ar.wroc.pl

niem procesu opracowania danych lotniczego skaningu laserowego jest identyfikacja punktów przynależnych do odpowiednich powierzchni. Zadanie to realizowane jest jako klasyfikacja lub filtracja danych pomiarowych. Pod pojęciem filtracji rozumieć należy pewien (semi)automatyczny sposób eliminacji punktów nie należących do modelowanej powierzchni. W pracy podjęto temat filtracji w celu identyfikacji punktów należących do fizycznej powierzchni terenu. O wadze i aktualności podjętego zagadnienia świadczyć może liczba opracowanych metod i liczba publikacji z tego zakresu. Znane dotychczas metody dzielimy na kilka grup:

- bazujące na odpornej predykcji liniowej [Kraus 2000, Kraus i Pfeifer 2001, Briese et al. 2002];
- polegające na iteracyjnym przybliżaniu pewnej, odpowiednio wybranej powierzchni startowej (TIN) do danych pomiarowych [Axelsson 1999, 2000];
- wykorzystujące operatory matematycznej morfologii (kryterium spadków terenu) [Vosselman i Maas 2001, Sithole 2001];
- wykorzystujące analizę skupień [Roggero 2001, Filin i Pfeifer 2006];
- bazujące na minimalizacji energii powierzchni, zależnej od jej nachylenia (spadku) [Elmqvist et al. 2001, Elmqvist 2002] i w postaci uogólnionej [Borkowski 2005].
- realizujące filtrację w dziedzinie częstotliwości: metody polegające na wykorzystaniu techniki FFT [Marmol i Jachimski 2004] lub analizy falkowej (*wavelet*) [Borkowski i Keller 2006].

Generalnie, metody filtracji można zaliczyć do jednej z dwóch grup:

- metody bazujące na danych oryginalnych,
- metody bazujące na danych opartych o regularną siatkę kwadratów, co wymaga dodatkowej interpolacji nieregularnie w płaszczyźnie  $xy$  rozrzuconych punktów (dane oryginalne).

Przegląd metod podany został w pracach: [Borkowski 2004, Sithole i Vosselman 2004]. W drugiej z nich dokonano również weryfikacji wyników filtracji przeprowadzonych różnymi metodami.

Z rozważań przeprowadzonych w pracy [Borkowski i Józków 2006] wynika, że:

- filtracja powinna być prowadzona w miarę możliwości na danych oryginalnych;
- algorytm powinien mieć dobre właściwości dopasowania do lokalnych struktur powierzchni terenu;
- algorytm powinien umożliwiać uwzględnienie dodatkowej informacji *a priori*;
- ze względu na wielkość zbiorów danych skaningu laserowego, rzędu  $10^6$ , nie bez znaczenia jest również złożoność obliczeniowa algorytmu.

W cytowanej pracy przedstawiono algorytm spełniający w znacznym stopniu podane oczekiwania. Bazuje on na, realizowanej hierarchicznie, odpornej aproksymacji danych wielomianową powierzchnią ruchomą.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań mających na celu weryfikację skuteczności filtracji z wykorzystaniem proponowanej metody. Wykonano w tym celu szereg testów numerycznych dla danych rzeczywistych skaningu pochodzących z różnych typów terenu, a wyniki filtracji automatycznej porównano z danymi referencyjnymi w postaci prawidłowo sklasyfikowanych punktów terenu i obiektów. Dane testowe i procedurę oceny wyników oparto na pracy [Sithole i Vosselman, 2004]. Otrzymane wskaźniki procentowe poszczególnych typów błędów mogą być zatem odniesione do innych, znanych z literatury, metod filtracji.

## WIELOMIAN RUCHOMY I ODPORNA ESTYMACJA PARAMETRÓW

W przestrzeni  $R^2$  wielomian dowolnego stopnia można zapisać w postaci:

$$z(x, y) = \sum_{i,j} a_{ij} x^i y^j, \quad i, j = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

Ponieważ korzystne właściwości aproksymacyjne wykazują jedynie wielomiany niskiego stopnia, wykorzystano w prezentowanym algorytmie wielomian drugiego stopnia:

$$z(x, y) = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{11}xy + a_{20}x^2 + a_{02}y^2, \quad (2)$$

gdzie:

$x, y$  – współrzędne płaskie punktu,

$a_{00}, a_{10}, a_{01}, a_{11}, a_{20}, a_{02}$  – parametry wielomianu,

$z(x, y)$  – wartość wielomianu (interpolowana powierzchnia).

Powierzchnia wielomianu dopasowywana jest do najbliższego otoczenia punktu interpolowanego, a nieznanne parametry  $a_{ij}$  wielomianu oblicza się lokalnie, oddzielnie w każdym punkcie metodą najmniejszych kwadratów,

$$\sum_{i=1}^n p_i v_i^2 \rightarrow \min. \quad (3)$$

Odchyłki  $v_i$  w punktach pomiarowych o wysokości  $h_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  obliczane są z zależności:

$$v_i = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{11}xy + a_{20}x^2 + a_{02}y^2 - h_i \quad (4)$$

natomiast wagi  $p_i$  punktów obliczane są według zależności:

$$p_i = (c / d_i)^r, \quad (5)$$

gdzie:

$c$  – wartość stała, najczęściej równa minimalnej odległości pomiędzy punktami pomiarowymi w zbiorze,

$r$  – wykładnik determinujący wpływ punktów lokalnego otoczenia na wartość interpolowaną,

$d_i$  – odległość pomiędzy punktem interpolowanym a punktem pomiarowym z najbliższego sąsiedztwa punktu interpolowanego.

Wagi punktów maleją jednocześnie ze wzrostem odległości od punktu interpolowanego, a szybkość ich zmniejszania się uzależniona jest głównie od wykładnika  $r$ , który determinuje wpływ punktów pomiarowych na przebieg powierzchni wielomianowej. Im większa wartość  $r$ , tym bardziej lokalny charakter wielomianu. Ponieważ punkty pewne

*a priori* są punktami terenowymi, zatem interpolowana powierzchnia wielomianu powinna przebiegać dokładnie lub w bardzo bliskiej odległości punktu pewnego, dlatego też dla punktów pewnych wagi  $p_i$  przyjmują zawsze stałą wartość, która jest zdecydowanie większa od wag pozostałych punktów z lokalnego otoczenia.

Parametry wielomianu (2) otrzymuje się z rozwiązania układu obserwacyjnego (4) zestawionego dla  $n$  punktów pomiarowych. Rozwiązanie w zapisie macierzowym przyjmuje postać:

$$\hat{x} = (A^T P A)^{-1} A^T P h, \quad (6)$$

gdzie:

$\hat{x} = [a_{00} \ a_{10} \ a_{01} \ a_{11} \ a_{20} \ a_{02}]^T$  – macierz parametrów wielomianu,

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1 y_1 & x_1^2 & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2 y_2 & x_2^2 & y_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_n y_n & x_n^2 & y_n^2 \end{bmatrix} \quad \text{– macierz współczynników,}$$

$P = \text{diag}\{p_1 \ p_2 \ \dots \ p_n\}$  – macierz wag,

$h = [h_1 \ h_2 \ \dots \ h_n]^T$  – macierz pomierzonych wysokości punktów.

Estymacja parametrów wielomianu metodą najmniejszych kwadratów (8) oznacza, że na wynik znaczny wpływ mają również błędy grube, którymi w omawianym procesie filtracji są wszystkie punkty nie będące odbiciami od powierzchni terenu. Wpływ błędów grubych może być wyeliminowany dzięki estymacji odpornej. W metodzie tej parametry otrzymuje się w wyniku rozwiązania zadania minimalizacyjnego:

$$\sum_{i=1}^n p_i \rho(v_i) \rightarrow \min, \quad (7)$$

Wprowadzona tutaj funkcja jest tzw. funkcją straty, która może być interpretowana jako odchylenie estymatora od poszukiwanej optymalnej wartości tego estymatora. Celowym jest zatem te odchylenia minimalizować. Rozwiązując zadanie minimalizacyjne (7), otrzymuje się układ równań normalnych, który odpowiada iteracyjnemu rozwiązaniu zadania najmniejszych kwadratów:

$$\sum_{i=1}^n p_i w(v_i)^{(k-1)} v_i^2 \rightarrow \min. \quad (8)$$

Wprowadzona dodatkowa funkcja wagowa  $w(v_i)$  związana jest z funkcją straty i obliczana iteracyjnie w  $k$ -tym kroku iteracji na podstawie poprawek z poprzedniego kroku ( $k-1$ ). Funkcja ta nazywana jest często funkcją tłumienia, która modyfikuje dotychczasowe wagi obserwacji:

$$\bar{p}_i = p_i w(v_i). \quad (9)$$

Uwzględniając zmodyfikowaną macierz wag, estymowane parametry wyznacza się w  $k$ -tym kroku iteracji z zależności [Koch 1996]:

$$\hat{x}^k = (A^T \bar{P}^{(k-1)} A)^{-1} A^T \bar{P}^{(k-1)} h. \quad (10)$$

Proces iteracyjny kończy się po uzyskaniu zgodności estymatora z poprzednim krokiem iteracji, na założonym poziomie dokładności.

Kluczowym zagadnieniem w estymacji odpornej jest wybór odpowiedniej funkcji tłumienia. Eksperymenty numeryczne przeprowadzone w pracy [Borkowski i Józków, 2006] pokazały, że spośród różnych funkcji tłumienia najlepsze rezultaty filtracji prezentowaną metodą otrzymuje się z wykorzystaniem funkcji Krausa [Kraus 2000]:

$$w(v) = \begin{cases} \frac{1}{1 + (\alpha|v - \delta|)^\beta}, & |v| > \sigma \\ 1, & |v| \leq \sigma \end{cases}, \quad (11)$$

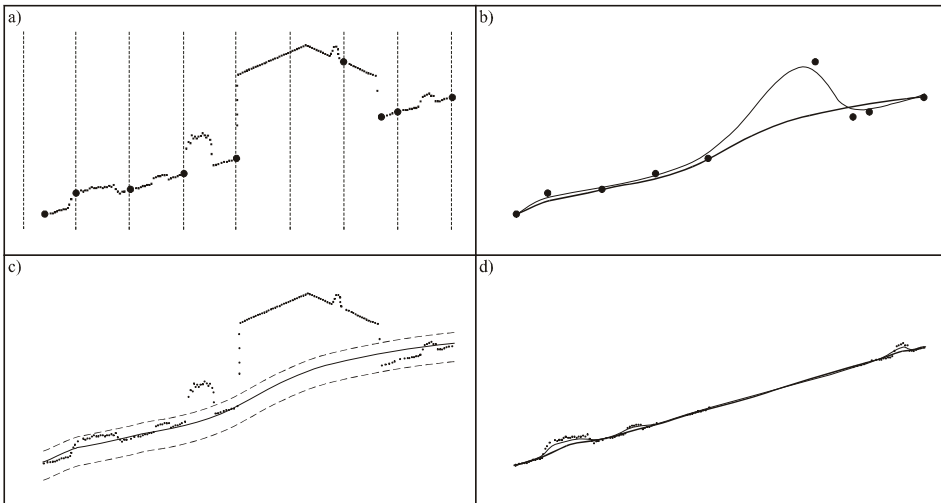
gdzie  $\delta$  jest dobieranym empirycznie parametrem determinującym zakres błędów przypadkowych. Dodatkowe parametry  $\alpha$  i  $\beta$ , również dobierane są empirycznie.

## FILTRACJA HIERARCHICZNA

W algorytmie wykorzystano ideę filtracji hierarchicznej zaproponowanej w pracy [Briese et al. 2002]. Rysunek 1 przedstawia w sposób schematyczny filtrację hierarchiczną dla profilu terenowego. Filtracja ta realizowana jest według następującego schematu:

- podział obszaru opracowania na mniejsze podobszary, dla których wybierany jest punkt reprezentatywny, najczęściej punkt najniższy (rys. 1a);
- odporna estymacja parametrów wielomianu ruchomego w punktach reprezentatywnych – stworzony zostaje model trendu nie uwzględniający lokalnych form ukształtowania terenu (rys. 1b);
- usunięcie ze zbioru punktów spoza ustalonego buforu trendu terenu (rys. 1c);
- odporna estymacja wielomianu ruchomego w punktach nie wyeliminowanych w poprzednim etapie (rys. 1d).

W algorytmie użytym w pracy – model hierarchiczny został rozszerzony do wieloetapowej filtracji hierarchicznej, w której opisane wyżej pierwsze trzy kroki następują po sobie kilkakrotnie, a wielkość bufora zmniejszana jest na każdym etapie.



Rys. 1. Schemat filtracji hierarchicznej [Briese et al. 2002]; objaśnienia w tekście  
 Fig. 1. Steps of the hierarchic filtration [Briese et al. 2002]; explanation in the text

Wieloetapowość pozwala na eliminację punktów obiektów znajdujących się coraz bliżej powierzchni terenu. Jak wykazały testy numeryczne, wadą jednoetapowej (najprostszy przypadek) filtracji hierarchicznej jest pozostawianie zbyt dużej liczby „punktów wysokich” lub eliminacja poprawnych punktów terenu w zależności od wielkości wybranego bufora dla trendu powierzchni terenu. Ostatni krok filtracji hierarchicznej (rys. 1d) ma na celu identyfikację punktów najniższych obiektów, np. niskiej roślinności.

## DANE TESTOWE ORAZ PROCEDURA WERYFIKACJI

Do oceny dokładności filtracji prezentowaną metodą wykorzystano oryginalne zbiory danych lotniczego skaningu laserowego [<http://www.itc.nl/isprswgIII-3/filtertest/Reference.zip>]. Jest to zestaw piętnastu specjalnie wyselekcjonowanych zbiorów będących fragmentami skaningu wykonanego skanerem Optech ALTM, gdzie rejestrowane były oba (pierwsze i ostatnie) odbicia. Każdy zestaw posiadał dane referencyjne w postaci zbiorów punktów terenu i punktów nie należących do powierzchni terenu (punktów obiektów). Obszary zestawów testowych zostały wybrane tak, by sprawdzić w jaki sposób automatyczne algorytmy wykonują filtrację danych zawierających różne obiekty, np. samochody, mosty, budynki, drzewa, rampy; oraz pozyskanych dla terenów o szczególnym ukształtowaniu, np. stromych zboczy, ostrych grzbietów, nieciągniętych obszarów, przy których może nastąpić błędna klasyfikacja punktów. Szczegółowy opis próbek testowych oraz uzasadnienie ich wyboru podano w pracy [Stihole i Vosselman 2004].

Procedura weryfikacji polegała na porównaniu wyników filtracji metodą wielomianowych powierzchni ruchomych z danymi referencyjnymi i określeniu parametrów ilościowych tego porównania. W wyniku filtracji metodą wielomianowych powierzchni ruchomych otrzymano dla każdej z próbek testowych dwa zbiory punktów:

- punkty sklasyfikowane jako punkty terenu – zbiór A,
- punkty sklasyfikowane jako punkty obiektów – zbiór B.

Zbiór danych referencyjnych również podzielony został na:

- punkty terenu – zbiór C,
- punkty obiektów – zbiór D.

Wykonując działania na powyższych zbiorach, każdy z punktów klasyfikowany jest do jednego z następujących zbiorów:

- zbiór E – część wspólna zbiorów C i A ( $C \cap A$ ), są to punkty terenu zidentyfikowane prawidłowo (rys. 2, rys. 3, rys. 4 a – punkty jasnoszare);
- zbiór F – różnica zbiorów C i A ( $C \setminus A$ ), są to punkty terenu zidentyfikowane przez algorytm jako punkty obiektów (błąd filtracji typu pierwszego), (rys. 2 – ciemnoszare krzyże, rys. 3, rys. 4 a – punkty niebieskie);
- zbiór G – różnica zbiorów D i B ( $D \setminus B$ ) są to punkty obiektów zidentyfikowane przez algorytm jako punkty terenu (błąd filtracji typu drugiego), (rys. 2 – ciemnoszare trójkąty, rys. 3, rys. 4 a – punkty czerwone);
- zbiór H – część wspólna zbiorów D i B ( $D \cap B$ ), są to punkty obiektów zidentyfikowane prawidłowo (rys. 2 – punkty czarne, rys. 3, rys. 4a – punkty ciemnoszare).

Jakość filtracji wyraża procentowy udział błędnie sklasyfikowanych przez algorytm punktów w całkowitej ilości punktów. Wówczas błędy filtracji typu pierwszego  $\sigma_1$ , typu drugiego  $\sigma_2$  oraz całkowity  $\sigma$  obliczane są według zależności:

$$\sigma_1 = \frac{f}{e+f}, \quad (12)$$

$$\sigma_2 = \frac{g}{g+h}, \quad (13)$$

$$\sigma = \frac{f+g}{e+f+g+h}, \quad (14)$$

gdzie:

$e, f, g, h$  – liczebność odpowiednio zbiorów E, F, G, H.

## ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW

Uzyskane wyniki dla zestawów testowych zestawiono w tabeli 1.

Poza jednym przypadkiem uzyskano skuteczność filtracji ponad 92%. W porównaniu z przeprowadzonymi testami ośmiu innych algorytmów [Sithole Vosselman 2004] we wszystkich przypadkach błędy całkowite filtracji metodą wielomianowych powierzchni ruchomych zbliżone są do błędu najlepszego z algorytmów, a niejednokrotnie są od niego mniejsze. Dla zestawu „Samp11” (teren zurbanizowany na stromym zboczu) uzyskano największy błąd typu pierwszego i całkowity. Spowodowane jest to trudnościami z poprawnym odróżnieniem przez algorytm punktów stromej zbocza od punktów obiektów.

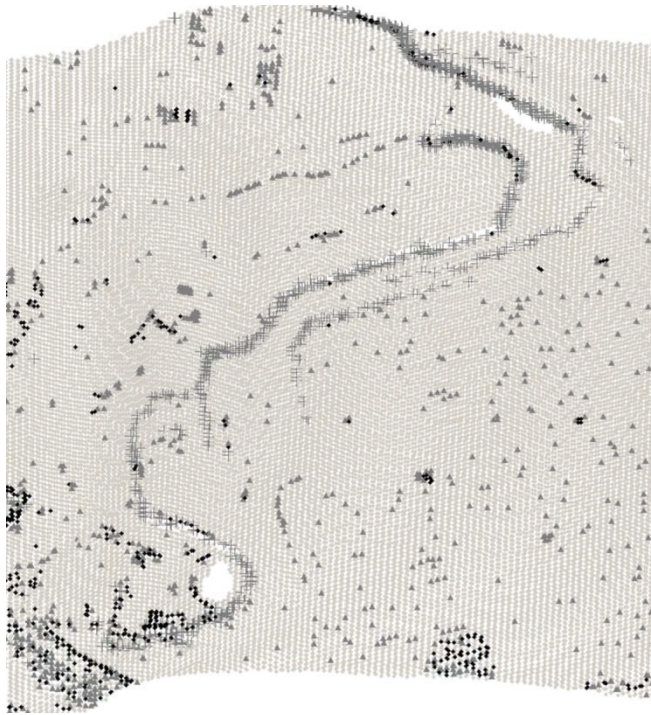
Tabela 1. Wartości procentowych błędów filtracji;  $\sigma_{\min}, \sigma_{\max}$  – całkowite błędy procentowe odpowiednio najlepszego i najgorszego algorytmu [Sithole i Vosselman 2004]

Table 1. Percentage values of errors of filtering;  $\sigma_{\min}, \sigma_{\max}$  – total percentage errors of best and worst algorithm [Sithole i Vosselman 2004]

Zestaw testowy Testing sample	Liczba punktów Number of points	$\sigma_1$ [%]	$\sigma_2$ [%]	$\sigma$ [%]	$\sigma_{\min}$ [%]	$\sigma_{\max}$ [%]
Samp11	38010	14,01	8,83	11,80	10,76	36,96
Samp12	52119	6,32	1,53	3,99	3,25	16,28
Samp21	12960	0,75	3,30	1,32	2,57	9,84
Samp22	32706	4,83	8,16	5,87	3,63	23,78
Samp23	25095	5,58	5,86	5,71	4,00	27,80
Samp24	7492	6,02	7,73	6,49	4,42	36,06
Samp31	28862	0,93	1,64	1,26	1,80	12,92
Samp41	11231	4,30	3,04	3,67	8,76	23,67
Samp42	42470	2,96	2,07	2,33	1,62	6,38
Samp51	17845	2,32	3,57	2,59	2,72	22,81
Samp52	22474	6,35	17,36	7,51	3,07	45,56
Samp53	34378	5,07	26,21	5,92	8,91	52,81
Samp54	8608	7,85	3,39	5,31	3,23	23,89
Samp61	35060	1,81	4,31	1,90	2,08	35,87
Samp71	15645	1,25	5,59	1,74	1,63	34,98
Samp12 (3 punkty pewne) (3 fixed points)	52119	6,09	1,54	3,87	–	–
Samp52 (18 punktów pewnych) (18 fixed points)	22474	4,73	17,57	6,08	–	–

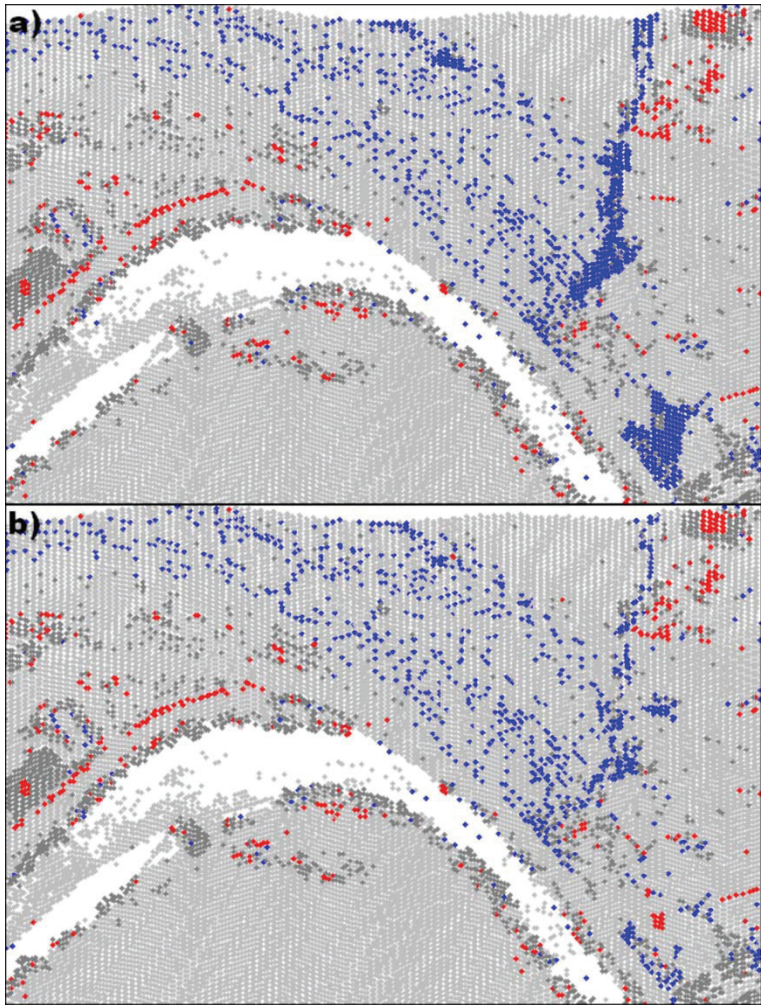
Większość znanych algorytmów skonstruowana jest w taki sposób, aby eliminować jak największą liczbę punktów obiektów, co niejednokrotnie powoduje również błędną klasyfikację sporej liczby punktów terenu. Tak jest również w przypadku testowanych w pracy [Sithole i Vosselman 2004] algorytmach, gdzie zazwyczaj procentowy błąd typu pierwszego jest większy niż typu drugiego. Dla metody wielomianowej okazuje się, że częściej procentowy błąd typu drugiego jest większy niż typu pierwszego. Uwzględniając doświadczenia z zakresu komercyjnego opracowania danych lotniczego skaningu laserowego, wydaje się być to cechą pozytywną, gdyż po filtracji automatycznej następuje jej ręczna korekta i łatwiej jest zauważyć punkty obiektów nie usunięte w procesie filtracji niż wyeliminowane niepotrzebnie ze zbioru punkty terenu. Duże wartości błędów typu drugiego dla niektórych testów często są wynikiem dysproporcji pomiędzy liczbą punktów terenu i obiektów. Dla zestawu „Samp53” prawie 96% punktów to punkty terenowe i jedynie 1398 punktów to punkty obiektów. Zatem błąd procentowy typu drugiego 26,21% to jedynie 364 błędnie sklasyfikowane punkty obiektów, a błąd typu pierwszego 5,07% to 1672 błędnie zidentyfikowane punkty terenu (rys. 2).



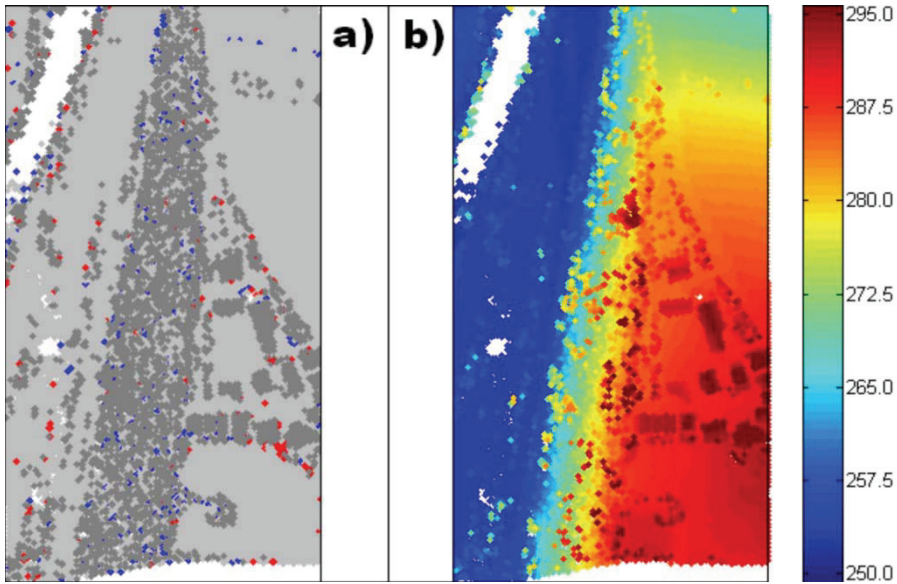


Rys. 2. Błędy filtracji: zestaw „Samp53”  
 Fig. 2. Filtering errors of sample „Samp53”

Przedstawiony algorytm pozwala na uwzględnienie w obliczeniach dodatkowej informacji *a priori* w postaci punktów pewnych terenu. Wybór punktów pewnych nie jest przypadkowy. Uzasadniony wydaje się wybór jedynie w tych miejscach, gdzie możliwe jest błędne sklasyfikowanie przez algorytm większych grup punktów terenu, np. wzdłuż wałów czy w miejscach o dużej przewadze liczbowej punktów niskich obiektów, które mogą nie zostać usunięte na etapie filtracji hierarchicznej. Jak wynika z przeprowadzonych testów, nawet niewielka liczba odpowiednio wybranych punktów pewnych powoduje zwiększenie skuteczności filtracji. Dla zestawu „Samp12” wybrano jedynie 3 punkty, które spowodowały poprawę klasyfikacji dodatkowo 62 punktów będących wcześniej błędami typu 1. Dla zestawu „Samp52” wybrano 18 punktów pewnych rozmieszczonych przede wszystkim na szczycie ostrego grzbietu. W tym przykładzie aż 326 dodatkowych punktów zostało poprawnie sklasyfikowanych jako punkty terenu (rys. 3). Z reguły, błędnie sklasyfikowane przez algorytm punkty porzucane są pojedynczo lub w małych grupach na całym obszarze, wówczas trudno uzyskać poprawę filtracji poprzez uwzględnienie punktów pewnych, jednak w pewnych przypadkach tylko kilka punktów pewnych może spowodować wzrost skuteczności filtracji nawet o 1%, co przy uzyskanych wynikach na poziomie 90% jest bardzo dobrym rezultatem. Na rysunku 4a przedstawiono rozmieszczenie błędów filtracji dla zestawu „Samp51” posiadającego różnorodne obiekty, np. drzewa, budynki, dużą skarpe oraz przerwę (*gap*) pomiędzy sąsiednimi skanami. Rysunek 4b przedstawia natomiast oryginalne dane tego zestawu.



Rys. 3. Błędy filtracji: zestaw „Samp52”; a) bez punktów pewnych, b) z punktami pewnymi  
Fig. 3. Filtering errors of sample „Samp52”; a) without fixed points, b) with fixed points



Rys. 4. Zestaw „Samp51”; a) błędy filtracji, b) dane oryginalne (wysokości kodowane kolorem)  
 Fig. 4. Sample „Samp51”; a) filtering errors, b) original data (heights color coded)

## WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki oceny poprawności filtracji danych lotniczego skaningu laserowego metodą wielomianowych powierzchni ruchomych. Na podstawie danych referencyjnych zostały określone procentowe błędy filtracji typu pierwszego, drugiego oraz całkowity. Porównując wyniki otrzymane z wykorzystaniem prezentowanej metody filtracji z innymi algorytmami [Sithole i Vosselman 2004], otrzymujemy pozytywną ocenę metodą wielomianowych powierzchni ruchomych. Zaletą metody jest również możliwość wykonania filtracji w podejściu hierarchicznym, a swobodny wybór parametrów, szczególnie wykładnika  $r$  funkcji wagowej (5) oraz parametrów  $\alpha$  i  $\beta$  funkcji tłumienia (11) pozwala na dobre dopasowanie modelowanej powierzchni do lokalnych struktur terenu. Algorytm ma możliwość uwzględnienia dodatkowej informacji *a priori* w postaci punktów, które są na pewno punktami terenowymi. Odpowiedni wybór punktów pewnych na niektórych formach ukształtowania terenu, np. wałach, powoduje znaczne podniesienie dokładności filtracji. Nie jest wymagana interpolacja danych pomiarowych, gdyż algorytm bazuje na danych oryginalnych. Algorytmu jest stosunkowo prosty, jednak konieczność wykonywania wielu kroków iteracji w odpornej estymacji parametrów wielomianu w każdym punkcie pomiarowym powoduje dużą ilość obliczeń numerycznych, co w przypadku opracowania większych zbiorów danych niesie z sobą konieczność użycia dużej mocy obliczeniowej.

## PIŚMIENNICTWO

- Axelsson P., 1999. Processing of laser scanner data – algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2), 138–147.
- Axelsson P., 2000. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIII-1/B4, 110–117.
- Borkowski A., 2004. Modellierung von Oberflächen mit Diskontinuitäten. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr 575.
- Borkowski A., 2005. Filtracja danych lotniczego skaningu laserowego z wykorzystaniem metody aktywnych powierzchni. *Roczniki Geomatyki*, tom III, zeszyt 4, PTIP, 35–42.
- Borkowski A., Jóźków G., 2006. Wykorzystanie wielomianowych powierzchni ruchomych w procesie filtracji danych pochodzących z lotniczego skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. XVI, 2006, 63–73.
- Borkowski A., Keller W., 2006. An Attempt to ALS-data filtering in wavelet domain. 8th Bilateral Geodetic Meeting Poland-Italy. Wrocław, 22–24 June. <http://www.geo.ar.wroc.pl/8bgmpi/>
- Briese C., Pfeifer N., Dorninger P., 2002. Applications of the robust interpolation for DTM determination. Symposium ISPRS Commission III, Photogrammetric Computer Vision, Graz, 9–13 September 2002. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV / 3A, 55–61.
- Elmqvist M., Jungert E., Persson A. und Soderman U., 2001. Terrain modelling and analysis using laser scanner data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV-3/W4, Annapolis, Maryland, 22–24 October, 219–227.
- Elmqvist M., 2002. Ground surface estimation from airborne laser scanner data using active shape models. ISPRS, Commission III, Symposium Photogrammetric Computer Vision, September 9–13, Graz, 114–118.
- Filin S., Pfeifer N., 2006. Segmentation of airborne laser scanning data using a slope adaptive neighborhood. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60, 71–80.
- Kraus K., 2000. *Photogrammetrie. Band 3. Topographische Informatonssysteme*. Dümmler, Köln.
- Kraus K., Pfeifer N., 2001. Advanced DTM generating from LIDAR data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV-3/W4, Annapolis, Maryland, 22–24 October, 23–30.
- Koch K.-R. 1996. Robuste Parameterschätzung. *AVN*, 103, 1–18.
- Marmol U., Jachimski J., 2004. A FFT based method of filtering airborne laser scanner data. ISPRS Congress, 12–23 July, Istanbul, Turkey, Commission 3. <http://www.isprs.org/commission3/wg3>
- Roggero M., 2001. Airborne laser scanning: Clustering in row data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV-3/W4, Annapolis, Maryland, 22–24 October, 227–232.
- Sithole G., 2001. Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV-3/W4, Annapolis, Maryland, 22–24 October, 203–210.
- Sithole G., Vosselman G., 2004. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vo. 59, 85–101.
- 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, Stockholm, 1–3 march.

# AIRBORNE LASER SCANNING DATA FILTERING USING MOVING POLYNOMIAL SURFACE MODEL – THE VERIFICATION OF THE METHOD

**Abstract.** For the digital terrain modelling from airborne laser scanning data the identification of points that are reflections from bare earth is the main issue of process of elaboration ALS data. In this work the hierarchic method of identification of points belonging to terrain surface was presented. This method is based upon the approximation of data using moving polynomial surface. Moving polynomial parameters are estimated locally based upon M-estimators of robust estimation method. In the estimation process the depended on the distance weighting function and asymmetrical damping function were used. A lot of numeric tests on the real airborne laser scanning data were executed. This data had a form of 15 testing samples contained referenced data as correctly classified terrain and objects' points. The method was verified based upon the comparison of data after automatic filtration with referenced sets of points. In the result of comparison the percentage errors of automatic filtering were determined. Total percentage filtering error was evaluated on the level from about 1% to about 12%. These values depended mainly on the terrain form and terrain coverage. It has been noticed that in the critical places e. g. along the dykes the including to the algorithm additional information a-priori as correct terrain points make the automatic filtering more accurate.

**Key words:** airborne laser scanning, filtering, moving polynomial surface, robust estimation

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 30.06.2008

Do cytowania – For citation: Barańska A., Józków G., 2008. Filtracja danych lotniczego skaningu laserowego metodą ruchomych powierzchni wielomianowych – weryfikacja metody. *Acta Sci. Pol. Geodesia et Descriptio Terrarum*, 7(2), 15–27.