

**Urszula Marmol**

**POZYSKIWANIE NUMERYCZNEGO MODELU  
POWIERZCHNI TOPOGRAFICZNEJ (NMPT) W OPARCIU  
O DANE WYSOKOŚCIOWE POCHODZĄCE Z LOTNICZEGO  
SKANERA LASEROWEGO**

**DERIVATION OF DIGITAL TERRAIN MODEL (DTM) FROM  
ELEVATION LASER SCANNER DATA**

*Akademia Górniczo-Hutnicza  
Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej  
University of Science and Technology  
Department of Photogrammetry and Remote Sensing Informatics*

Streszczenie:

Lotniczy skaning laserowy (*LIDAR - Light Detection And Ranging*) jest nową, dynamicznie rozwijającą się metodą pozyskiwania informacji o powierzchni terenu.

Pomiar laserowy dostarcza informacji w postaci trójwymiarowej „chmury punktów” nieregularnie próbkowanych, zarówno o powierzchni topograficznej jak również o innych strukturach badanego terenu (budynki, roślinność itp.). W wielu opracowaniach obszarem zainteresowań jest głównie powierzchnia topograficzna. Proces eliminacji punktów pokrycia terenu, zwany także filtracją stanowi jeden z głównych problemów przetwarzania danych laserowych.

W ostatnich latach zostały opracowane algorytmy do automatycznej filtracji danych laserowych. Niestety, istniejące metody i oprogramowania posiadają jeszcze widoczne ograniczenia i nadal niezbędny jest znaczący, czasochłonny, interaktywny udział operatora.

W niniejszym artykule przedstawiono analizę porównawczą pomiędzy algorytmem filtracyjnym opartym na FFT, badanym obecnie w Zakładzie Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH a filtracją metodą liniowej predykcji opracowaną w Instytucie Fotogrametrii i Teledetekcji Uniwersytetu Technicznego w Wiedniu.

Głównym celem badań była kontrola wiarygodności i efektywności algorytmu opartego na FFT. Uzyskane wyniki badań udowodniły, że metoda ta w sposób właściwy eliminuje punkty pokrycia terenu z danych laserowych. Konieczna jest dalsza weryfikacja algorytmu dla różnych form ukształtowania i pokrycia powierzchni topograficznej.

SŁOWA KLUCZOWE: LIDAR, algorytm, NMPT, FFT

## **1 LOTNICZY SKANING LASEROWY**

Lotniczy skaning laserowy (*LIDAR - Light Detection And Ranging*) jest nową, dynamicznie rozwijającą się metodą pozyskiwania informacji o powierzchni terenu.

Technika ta bazuje na zdalnym pomiarze odległości od sensora do punktów terenowych. Pozycja samolotu jest określana przy wykorzystaniu systemu GPS i INS. W rezultacie możliwe jest określenie współrzędnych sytuacyjnych i wysokościowych punktów terenowych.

Pomiar laserowy dostarcza informacji w postaci trójwymiarowej „chmury punktów” nieregularnie próbkowanych, zarówno o powierzchni topograficznej jak również o innych strukturach badanego terenu (budynki, roślinność itp.). W wielu opracowaniach (planowanie linii komunikacyjnych i obiektów przemysłowych, gospodarka leśna, prognozowanie zagrożeń itp.) obszarem zainteresowań jest głównie powierzchnia topograficzna. Proces eliminacji punktów pokrycia terenu, zwany także filtracją stanowi jeden z głównych problemów przetwarzania danych laserowych.

W ostatnich latach zostały opracowane algorytmy do automatycznej filtracji danych laserowych. Niestety, istniejące metody i oprogramowania posiadają jeszcze widoczne ograniczenia i nadal niezbędny jest znaczący, czasochłonny, interaktywny udział operatora.

W kilku ośrodkach badawczych w Europie i na świecie prowadzone są badania nad problematyką przetwarzania danych lidarowych. Powstałe metody filtracyjne, oparte są między innymi na: filtrach morfologicznych [Eckstein, Munkelt, 1995, Vosselman, 2000, Zhang i inni, 2002], liniowej predykcji [Kraus, 1997], czy elastycznym modelowaniu TIN [Axelsson, 2000]. Posiadają one określone zalety i wady w zależności od charakteru i ukształtowania analizowanego terenu. Niektóre algorytmy działają prawidłowo w przypadku terenów zalesionych, inne w obszarach zabudowanych. W dotychczasowych badaniach nie została jeszcze opracowana metoda optymalna dla wszelkich możliwych przypadków [Sithole, 2003].

Zalety skaningu laserowego, między innymi: niezależność od warunków oświetleniowych i częściowo pogodowych, wysoka dokładność i gęstość danych źródłowych, wysoka automatyzacja i relatywnie niski koszt sprawiają, że technologia ta w najbliższych latach stanie się najprawdopodobniej głównym źródłem pozyskiwania NMPT. Problematyka dotycząca przetwarzania danych laserowych jest zatem zagadnieniem istotnym i aktualnym.

## **2 METODYKA BADAŃ**

Celem badań było porównanie dwóch algorytmów filtracji danych laserowych: metody liniowej predykcji opracowanej przez Instytut Fotogrametrii i Teledetekcji Uniwersytetu Technicznego w Wiedniu i metody opartej na FFT badanej obecnie w Zakładzie Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH w Krakowie. Oryginalne dane laserowe, z wybranego pola testowego, zostały poddane procesowi filtracji z wykorzystaniem obydwóch metod.

W wyniku działania algorytmów powstały zbiory rozproszonych punktów odfiltrowanych.

W pierwszym etapie przebadano zbiory punktów rozproszonych odfiltrowanych z zastosowaniem obu algorytmów i określono ilość punktów zaklasyfikowanych jako

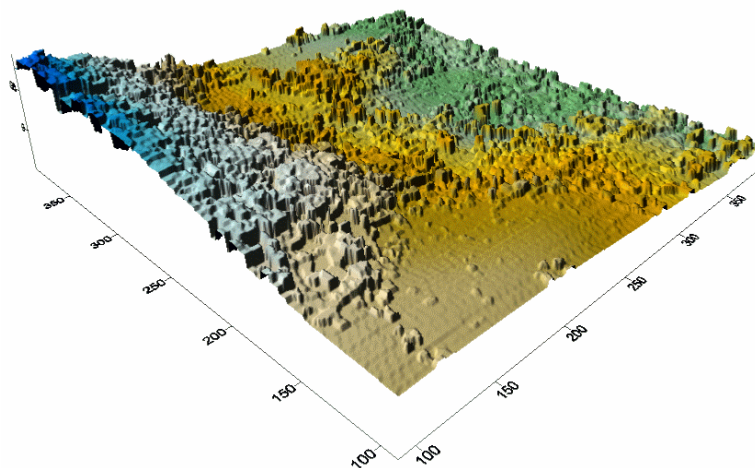
terenowe w stosunku do wszystkich punktów pomiarowych. Wyznaczono także część wspólną tych dwóch zbiorów.

Na podstawie zbiorów punktów odfiltrowanych wygenerowano Numeryczne Modele Powierzchni Topograficznej (NMPT) w siatkach regularnych z zastosowaniem tej samej metody interpolacyjnej – metody odwrotnych odległości (*ang. inverse distance to a power*).

Analiza dokładności w tym przypadku polegała na określeniu odchyłek pomiędzy odpowiadającymi sobie węzłami w siatkach regularnych. Uzyskane odchyłki pozwoliły na wyznaczenie podstawowych parametrów statystycznych (średni błąd kwadratowy – RMSE (*ang. Root Mean Square Error*), wartość średnia -  $\mu$ , odchyłka maksymalna i minimalna).

### 3 POLE TESTOWE: LASEK WIEDEŃSKI

Testowana powierzchnia (Rys.1) została udostępniona przez Instytut Fotogrametrii i Teledetekcji Uniwersytetu Technicznego w Wiedniu [Kraus, 1998]. Są to dane laserowe o średnim odstępnie między punktami pomiarowymi 3.1 m. Badany teren to pagórkowaty obszar Lasku Wiedeńskiego, o powierzchni  $300\text{m} \times 300\text{m}$  i nachyleniu średnim  $18^\circ$ . Systemem wykorzystanym przez firmę TopoScan był laser ALTM 1020 (Optech Inc, Kanada). Badany obszar zawiera około 8 tysięcy punktów.



Rys.1 Testowana powierzchnia – surowe dane laserowe.

Fig.1 A test area – raw laser data.

#### 4 METODA LINIOWEJ PREDYKCJI

Metoda interpolacji powierzchni została oparta na predykcji liniowej [Kraus, Mikhail, 1972] z indywidualnym określeniem dokładności każdego pomiaru. W pierwszym kroku algorytmu powierzchnia jest obliczana z równymi wagami dla wszystkich punktów pomiarowych. Stanowi ona uśrednioną powierzchnię pomiędzy punktami terenowymi, a punktami pokrycia. Obliczane są odchyłki pomiędzy punktami pomiarowymi a wyinterpolowaną powierzchnią. Prawdziwe punkty topograficzne mają duże ujemne odchyłki, podczas gdy punkty pokrycia mają odchyłki dodatnie lub odchyłki ujemne o niewielkich wartościach.

Istotną sprawą jest wybór odpowiedniego modelu stochastycznego definiującego funkcję wagową. Została ona określona w następujący sposób:

$$p_i = \begin{cases} 1 & v_i \leq g \\ \frac{1}{1 + (a \cdot (v_i - g)^b)} & g \leq v_i \leq g + w \\ 0 & g + w < v_i \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

$a, b$  – parametry określające funkcję wagową,

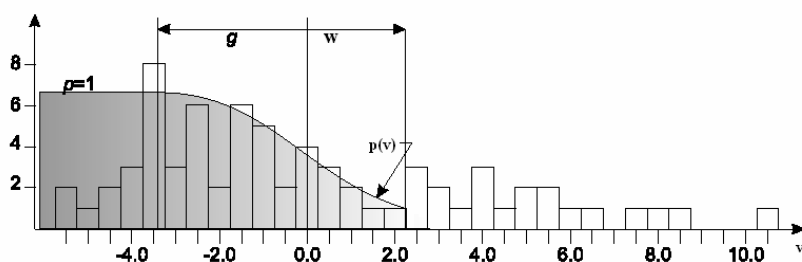
$a = 1/h$

$b = 4h + s$ , gdzie  $h, s$  jest odpowiednio wartością szerokości i nachylenia funkcji dla wagi równej 0.5,

$g$  – wartość przesunięcia, obliczana z histogramu odchyłek,

$v_i$  – odchyłki pomiędzy punktami pomiarowymi a wyinterpolowanymi w kolejnej iteracji,

$w$  – wartość tolerancji,



Rys. 2 Rozkład odchyłek  $v_i$  po pierwszym kroku interpolacji z nałożoną funkcją wagową  $p(v)$ .  
Źródło: [Pfeifer i inni, 1999].

Fig. 2 Residual  $v_i$  distribution after the first interpolation step and superimposed the weight function  $p(v)$ . Source: [Pfeifer et al, 1999].

Każdy punkt pomiarowy jest wagowany według swojej odchyłki. Punkty o ujemnych odchyłkach (bardziej precyzyjnie – punkty o odchyłkach mniejszych niż wartość  $g$ ) otrzymują maksymalną wagę równą 1. Dla odchyłek o dużych wartościach dodatnich (większych niż  $g+w$ ) wagi przyjmują wartość 0 (Rys.2).

Stosowane są różne metody określania wartości  $g$ . Szczegóły można odnaleźć w [Kraus, Pfeifer, 1998]. Wszystkie sposoby oparte są na analizie histogramu odchyłek wcześniejszej iteracji.

Wagi  $p_i$  są wykorzystywane do iteracyjnego obliczania powierzchni. Punkty pomiarowe o dużych ujemnych odchyłkach mają maksymalne wagi i przybliżają obliczaną powierzchnię, punkty ze średnimi odchyłkami mają mniejsze wagi i mniejszy wpływ na obliczenia. Punkty o odchyłkach większych niż  $g+w$  są eliminowane.

Drugim istotnym problemem jest wybór odpowiedniej metody interpolacji. Konieczny jest wybór metody, która uwzględni stochastyczny model funkcji wagowej. Autorzy wykorzystali predykcję liniową, interpolację bardzo zbliżoną do krigingu. Powierzchnia interpolowana w punkcie  $P_i$  jest zadana wzorem [Briese i inni, 2002]:

$$z_{P_i} = c^T \cdot C^{-1} \cdot z \quad (2)$$

gdzie:

$z_{P_i}$  – wartość interpolowana w punkcie  $P_i$ ,

$z$  – wektor wysokości punktów pomiarowych, zredukowanych o wartość trendu,

$c$  – kowariancja między punktem interpolowanym a punktami pomiarowymi,

$c^T = [C(P_i, P_1) C(P_i, P_2) \dots C(P_i, P_n)]$

$C$  – macierz kowariancji pomiędzy punktami pomiarowymi,

$$C = \begin{bmatrix} V_{zz1} & C(P_1P_2) & \cdots & C(P_1P_n) \\ C(P_2P_1) & V_{zz2} & \cdots & C(P_2P_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C(P_nP_1) & C(P_nP_2) & \cdots & V_{zzn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$V_{zz}$  – wariancja punktów pomiarowych,

Funkcja  $C(P_i, P_k)$  opisuje kowariancję pomiędzy dwoma punktami powierzchni w następujący sposób:

$$C(P_i P_k) = C(0) \cdot e^{-\frac{\overline{P_i P_k}}{B}} \quad (4)$$

gdzie:

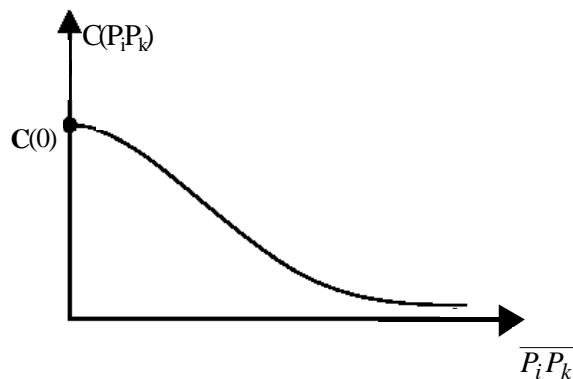
$C(0)$  – wartość najwyższa funkcji kowariancji, kowariancja dla wartości zero,

$B$  – czynnik (oszacowany z punktów pomiarowych), określający nachylenie funkcji kowariancji,

$P_i$  i  $P_k$  – punkty pomiarowe,

$\overline{P_i P_k}$  - odległość między punktami  $P_i$  i  $P_k$ ,

Równanie (4) określa kowariancję pomiędzy punktami pomiarowymi  $P_i$  i  $P_k$ , która zależy od odległości między nimi (Rys.3). Jeśli punkty są blisko siebie, kowariancja jest wysoka, wraz ze wzrostem odległości, kowariancja dąży do zera. Parametry  $C(0)$  i  $B$  są znane lub są określane doświadczalnie dla każdego przypadku.



Rys.3 Funkcja kowariancji.

Fig.3 Covariance function.

## 5 METODA OPARTA NA FFT

Opracowany algorytm oparty jest na teorii przetwarzania sygnałów cyfrowych. Powierzchnia terenu może być przedstawiona przez skończoną ilość funkcji sinusoidalnych o odpowiedniej częstotliwości, amplitudzie i fazie. Jej reprezentacja jest zatem zbliżona do zmienności sygnału elektrycznego. Zakłócenia występujące w przebiegu powierzchni topograficznej, związane z pomiarem elementów pokrycia terenu, mogą być utożsamiane z szumem pojawiającym się podczas transmisji sygnału. Analiza widmowa umożliwia otrzymanie zależności pomiędzy dziedziną przestrzenną powierzchni topograficznej a jej dziedziną częstotliwościową. Dyskretne dane przestrzenne są opisywane w dziedzinie częstotliwości przez zastosowanie Szybkiej Transformacji Fouriera. Główne założenie bazuje na twierdzeniu, że niskie częstotliwości odpowiadają za przebieg powierzchni topograficznej, podczas gdy częstotliwości wysokie związane są z obiektami, występującymi na terenie. Szczegóły teoretyczne metody opartej na FFT zostały przedstawione na Ogólnopolskim Sympozjum Naukowym w Białobrzegach [Marmol, 2002].

Zaprojektowana metoda działa iteracyjnie i składa się z następujących etapów:

1. Interpolacja rozproszonych punktów laserowych do siatki regularnej. W celu zminimalizowania błędów związanych z interpolacją zdecydowano się na interpolację metodą „najbliższego sąsiada” (*ang. nearest neighbor*). W metodzie tej wartość węzła jest przyjmowana od najbliższej położonego punktu pomiarowego.
2. Zastosowanie FFT.
3. Określenie częstotliwości odcięcia.
4. Filtracja cyfrowa z wykorzystaniem filtrów o skończonej odpowiedzi impulsowej – FIR (*ang. Finite Impulse Response*).
5. Powrót do danych rozproszonych spełniających kryterium odległości (określonego na podstawie błędu wynikającego z interpolacji [Pfeifer i inni, 1999]).

## 6 ANALIZA PORÓWNAWCZA ALGORYTMÓW

W pierwszym etapie przebadano zbiory rozproszonych punktów odfiltrowanych. Porównano ilość punktów zaklasyfikowanych jako punkty terenowe w wyniku działania obydwóch algorytmów. Określono także część wspólną tych dwóch zbiorów. Uzyskane wyniki przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1 Porównanie filtrów (punkty rozproszone).

Table 1 Comparison of filters (irregularly distributed data).

PUNKTY ROZPROSZONE	
Całkowita ilość punktów pomiarowych: 7376	
Metoda liniowej predykcji	Metoda oparta na FFT
Ilość punktów zaklasyfikowanych jako punkty terenowe: 3677	Ilość punktów zaklasyfikowanych jako punkty terenowe: 3740
Ilość tych samych punktów zaklasyfikowanych jako punkty terenowe: 3568	

W wyniku wizualnej analizy wyników stwierdzono, że pojawiają się błędy grube związane z fragmentem obszaru (30m × 50m), gdzie wszystkie punkty laserowe stanowią odbicie od pokrycia terenu. Zdecydowano się na wyłączenie tego obszaru z dalszej analizy.

Na podstawie zbiorów rozproszonych wygenerowano dwie siatki regularne NMPT o interwale 3m z zastosowaniem tej samej metody interpolacyjnej – metody odwrotnych odległości (*ang. inverse distance to a power*). Wyznaczone odchyłki pomiędzy odpowiadającymi sobie węzłami siatek. Analiza porównawcza polegała na wyznaczeniu podstawowych parametrów statystycznych. Uzyskane wyniki zostały przedstawione w Tabeli 2.

Tabela 2. Porównanie filtrów (punkty w regularnej siatce).

Table 2 Comparison of filters (grid data).

PUNKTY W SIATCE REGULARNEJ
$RMSE = 0.24$ [m]
wartość średnia $\mu = 0.03$ [m]
błąd maksymalny = 3.43
błąd minimalny = -2.89

## 7 WNIOSKI

Uzyskane rezultaty pozwalają stwierdzić, że algorytm oparty na FFT przynosi satysfakcjonujące wyniki. Oczywiście, formułowanie definitywnych wniosków na podstawie jednego pola testowego jest ryzykowne i niewłaściwe. Algorytm powinien zostać poddany dalszej weryfikacji z wykorzystaniem wielu pól treningowych, reprezentujących obszary o różnym ukształtowaniu i użytkowaniu.

## LITERATURA

- [1] Axelsson P.: DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Vol. XXXIII/4B, Amsterdam 2000.



- [2] Briese Ch., Pfeifer N., Dorninger P.: Applications of the robust interpolation for DTM determination. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV / 3A, Graz 2002.
- [3] Eckstein W., Munkelt O.: Extracting objects from digital terrain models. Proc. SPIE 2572, 1995.
- [4] Kraus K., Pfeifer N.: Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 53, 1998.
- [5] Kraus K., Mikhail E. M.: Linear least squares interpolation. Photogrammetric Engineering 38, 1972.
- [6] Marmol U.: Analiza częstotliwościowa jako metoda filtrowania profili powierzchni topograficznej. Materiały Ogólnopolskiego Sympozjum Naukowego „Fotogrametria i teledetekcja w społeczeństwie informacyjnym” Białobrzegi k/Warszawy, 2002.
- [7] Pfeifer N., Reiter T., Briese C., Rieger W.: Interpolation of high quality ground models from laser scanner data in forested areas. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXII / 3, La Jolla 1999.
- [8] Sithole G., Vosselman G.: Report: ISPRS comparison of filters. ISPRS Commission III, Working Group 3, 2003.
- [9] Vosselman G.: Slope based filtering of laser altimetry data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Vol. XXXIII, Amsterdam 2000.
- [10] Zhang K., Chen S., Whitmann D., Shyu M., Yan J., Zhang C.: A progressive morphological filter for removing non-ground measurements from airborne LIDAR data. Journal of Latex Class Files. 1(8), 2002.

## **S u m m a r y**

### **DERIVATION OF DIGITAL TERRAIN MODEL (DTM) FROM ELEVATION LASER SCANNER DATA**

Airborne laser altimetry (LIDAR – Light Detection and Ranging) is a relatively new method for the acquisition of information of terrain surface. A laser scanning system generates a 3-dimensional clouds of points with irregular spacing. The data consists of the mixture of terrain surface and non-surface points (buildings, vegetation).

The separation of ground points from the other points located on top of buildings, vegetation or other objects above ground is one of the major problems. Algorithms and software used for the surface reconstruction have limitations that should be studied and overcome. Removing non – ground points from LIDAR data sets i.e. filtering is still a challenging task.

The paper presents a comparative analysis of two filtering methods: FFT based algorithm (a new method investigated at the Department of Photogrammetry and Remote Sensing Informatics at the University of Science and Technology in Cracow) and linear prediction method developed at the Institute of Photogrammetry and Remote Sensing at the Vienna University of Technology . The main purpose of this analysis is to verify FFT based method.

FFT based algorithm demonstrate promising results of the terrain surface reconstruction (DTM). However, further investigation is required to verify the reliability and accuracy of filtering algorithm on different types of terrain.

**KEY WORDS:** LIDAR, algorithm, DTM, FFT