

FILTRACJA DANYCH LOTNICZEGO SKANINGU LASEROWEGO Z WYKORZYSTANIEM METODY AKTYWNYCH POWIERZCHNI¹

FILTERING OF AERIAL LASER SCANNER DATA BY ACTIVE SURFACE MODEL

Andrzej Borkowski

Katedra Geodezji i Fotogrametrii, Akademia Rolnicza we Wrocławiu

Słowa kluczowe: skaniny laserowy, filtracja, aktywne powierzchnie

Keywords: laser scanning, filtering, flakes

Wstęp

Znaczną część zbiorów danych lotniczego skaniny laserowego stanowią odbicia od obiektów leżących ponad powierzchnią terenu, np. drzew, budynków. Punkty takie traktowane są jako błędy grube i muszą być usunięte ze zbiorów danych, jeśli dane te mają posłużyć do interpolacji numerycznego modelu powierzchni terenowej.

Pod pojęciem filtracji należy rozumieć pewną formę (automatycznej) eliminacji punktów nie należących do modelowanej powierzchni. W różnych ośrodkach naukowych opracowano kilka algorytmów filtracji. Ich zestawienie i ocenę możliwości znaleźć można w raporcie (Sithole i Vosselman, 2003, 2004) i pracy (Borkowski, 2004). Do najbardziej skutecznych należą algorytmy: bazujące na odpornej predykcji liniowej (Kraus, 2000; Kraus i Pfeifer, 2001, Briese et al., 2002), iteracyjnym przybliżaniu pewnej, odpowiednio wybranej powierzchni startowej do danych pomiarowych (Axelsson, 1999, 2000), wykorzystaniu operatorów matematycznej morfologii (kryterium spadków terenu) (Vosselman i Maas, 2001; Roggero, 2001; Sithole, 2001), minimalizacji energii powierzchni, zależnej od jej nachylenia (spadku) (Elmqvist et al., 2001; Elmqvist, 2002). W Polsce prace w zakresie filtracji danych skaniny laserowego prowadzone są w Zakładzie Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH, a bazują one na filtracji cyfrowej z wykorzystaniem FFT (Marmol, 2000, Marmol i Jachimski, 2004).

Wszystkie istniejące metody filtracji mają swoje zalety ale i ograniczenia; zawodzą w terenach o skomplikowanej strukturze, na przykład w terenach zurbanizowanych zawierających duże kompleksy budowlane.

¹Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2005–2007 jako projekt badawczy.

Model aktywnej powierzchni, będący rozwiązaniem zadania minimalizacyjnego energii, został wprowadzony w pracy (Borkowski, 2004) jako uogólnienie modelu Snake (Kass et al., 1987). Przez odpowiednią definicję energii zewnętrznej można model ten uodpornić na błędy grube aproksymowanych danych. W niniejszej pracy przedstawiono ideę wykorzystania metody do filtracji danych skaningu laserowego.

Model aktywnych powierzchni

Wyobraźmy sobie dostatecznie małe, gładkie elementy powierzchni, którym przyporządkowana jest pewna energia, która aktywnie dopasowuje powierzchnię do danych pomiarowych i jednocześnie pozwala zachować pożądane właściwości geometryczne tej powierzchni. Dla takiego modelu zaproponowano określenie *flakes* (Borkowski et al., 1997; Borkowski, 2004).

Energia całkowita E_{tot} przypisana poszczególnym elementom powierzchni jest sumą energii wewnętrznej i zewnętrznej:

$$E_{tot} = E_{int} + E_{ext} \quad (1)$$

Energia wewnętrzna E_{int} opisuje właściwości geometryczne modelowanej powierzchni i jest ważoną sumą jej nachylenia (*membrane kernel*), reprezentowanego przez kwadrat normy gradientu $z_x + z_y$ i krzywizny (*thin plate kernel*), reprezentowanej przez kwadrat hesjanu $z_{xx}^2 + 2z_{xy}^2 + z_{yy}^2$,

$$E_{int} = \frac{\alpha}{2} (z_x^2 + z_y^2) + \frac{\beta}{2} (z_{xx}^2 + 2z_{xy}^2 + z_{yy}^2), \quad (2)$$

gdzie $z_x := \partial z / \partial x$, $z_{xx} := \partial^2 z / \partial x^2$, itd. α i β są swobodnymi parametrami wagowymi (sterującymi) dobieranymi zależnie od zastosowania i pożądanych właściwości geometrycznych (gładkości) modelowanej powierzchni. Energia zewnętrzna E_{ext} jest zależna od danych i jest definiowana zależnie od zastosowania – najczęściej opisuje rozbieżność pomiędzy modelowaną powierzchnią a danymi pomiarowymi. Podany w dalszej części pracy model energii wewnętrznej pozwala uodpornić *flakes* na błędy grube danych pomiarowych.

Prezentowany model powierzchni aproksymuje dane pomiarowe w sposób optymalny. Oznacza to minimalizację energii całkowitej wszystkich elementów powierzchni na obszarze $B \subset \mathbb{R}^2$ obejmującym dane pomiarowe,

$$I(z(x, y)) = \iint_B E_{tot}(z; z_x, z_y; z_{xx}, z_{xy}, z_{yy}) dx dy \rightarrow \min \quad (3)$$

Warunkiem koniecznym do tego, aby funkcja $z = z(x, y)$ była funkcją ekstremalną funkcjonału (3) jest spełnienie przez tę funkcję równania różniczkowego czwartego rzędu, tak zwanego równania Eulera (Bronstein i Semendjajew, 1962)

$$E_z - \frac{\partial}{\partial x} E_{z_x} - \frac{\partial}{\partial y} E_{z_y} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} E_{z_{xx}} + \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} E_{z_{xy}} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} E_{z_{yy}} = 0 \quad (4)$$

Po obliczeniu, z wykorzystaniem podanych definicji energii, występujących w (4) pochodnych i niewielkich przekształceniach otrzymuje się równanie różniczkowe czwartego rzędu

$$\frac{\partial E_{ext}}{\partial z} - \alpha(z_{,xx} + z_{,yy}) + \beta(z_{,xxxx} + 2z_{,xyxy} + z_{,yyyy}) = 0 \quad (5)$$

w którym parametry wagowe α i β są stałe dla danej powierzchni. Równanie to rozwiązywane jest numerycznie.

Realizacja numeryczna

Równanie różniczkowe (5) dyskretyzowane jest tak zwaną metodą różnic skończonych, to znaczy występujące pochodne drugiego i czwartego rzędu aproksymowane są przez odpowiednie skończone wyrażenia. Wyrażenia te mogą być praktycznie podane dla danych o określonej regularnej strukturze. W naszym przypadku ograniczymy się do siatki kwadratów.

Przyjmując oznaczenia poszczególnych wartości siatki kwadratów zgodnie z rysunkiem 1 otrzymamy wyrażenia aproksymacyjne dla poszczególnych pochodnych:

$$z_{,xx} |_{i,j} = \frac{1}{\Delta_x^2} (z_{i+1,j} - 2z_{i,j} + z_{i-1,j})$$

$$z_{,yy} |_{i,j} = \frac{1}{\Delta_y^2} (z_{i,j+1} - 2z_{i,j} + z_{i,j-1})$$

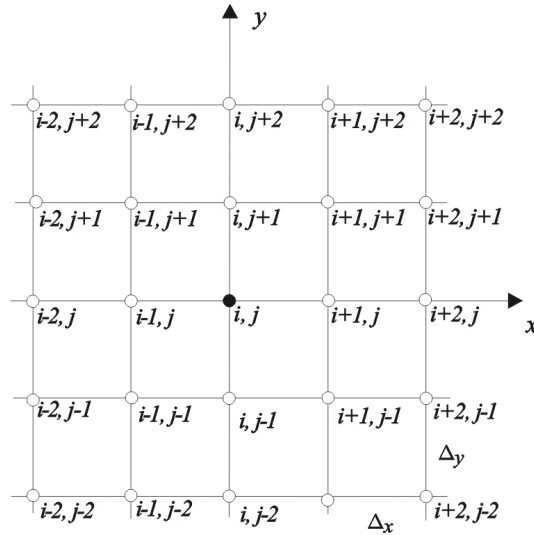
$$z_{,xxx} |_{i,j} = \frac{1}{\Delta_x^4} (z_{i+2,j} - 4z_{i+1,j} + 6z_{i,j} - 4z_{i-1,j} + z_{i-2,j})$$

$$z_{,yyy} |_{i,j} = \frac{1}{\Delta_y^4} (z_{i,j+2} - 4z_{i,j+1} + 6z_{i,j} - 4z_{i,j-1} + z_{i,j-2})$$

$$z_{,xyxy} |_{i,j} = \frac{1}{16\Delta_x^2\Delta_y^2} (z_{i-2,j+2} - 2z_{i,j+2} + z_{i+2,j+2} - 2z_{i-2,j} + 4z_{i,j} - 2z_{i+2,j} + z_{i-2,j-2} - 2z_{i,j-2} + z_{i+2,j-2})$$

Po wstawieniu do równania (5), założeniu, że $\Delta_x = \Delta_y = 1$ i przekształceniu otrzymujemy równanie liniowe postaci:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{ext}}{\partial z} - dz_{i-2,j+2} + cz_{i,j+2} + dz_{i+2,j+2} + bz_{i,j+1} + cz_{i-2,j} + bz_{i-1,j} + \\ + az_{i,j} + bz_{i+1,j} + cz_{i+2,j} + bz_{i,j-1} + dz_{i-2,j-2} + cz_{i,j-2} + dz_{i+2,j-2} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$



Rys. 1. Oznaczenie danych dla siatki kwadratów

gdzie

$$\begin{aligned} a &:= 4a + \frac{25}{2}b, & b &:= -(a + 4b), \\ c &:= \frac{3}{4}b, & d &:= \frac{1}{8}b \end{aligned} \quad (7)$$

Równanie (6) należy zestawić dla każdego punktu danych. Mamy zatem układ równań liniowych

$$\mathbf{A}\mathbf{z} = \mathbf{b} \quad (8)$$

Jeśli przyjmiemy, że modelowane dane podane są na siatce kwadratów z_{ij} , $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$ to,

$$\mathbf{z} = \left[z_{1,1} \quad \dots \quad z_{1,m} \quad z_{2,1} \quad \dots \quad z_{2,m} \quad \dots \quad z_{n,1} \quad \dots \quad z_{n,m} \right]^T$$

Wektor \mathbf{b} zawiera pochodne energii zewnętrznej w poszczególnych punktach danych:

$$\mathbf{b} = - \left[E_z|_{1,1} \quad \dots \quad E_z|_{1,m} \quad E_z|_{2,1} \quad \dots \quad E_z|_{2,m} \quad \dots \quad E_z|_{n,1} \quad \dots \quad E_z|_{n,m} \right]^T,$$

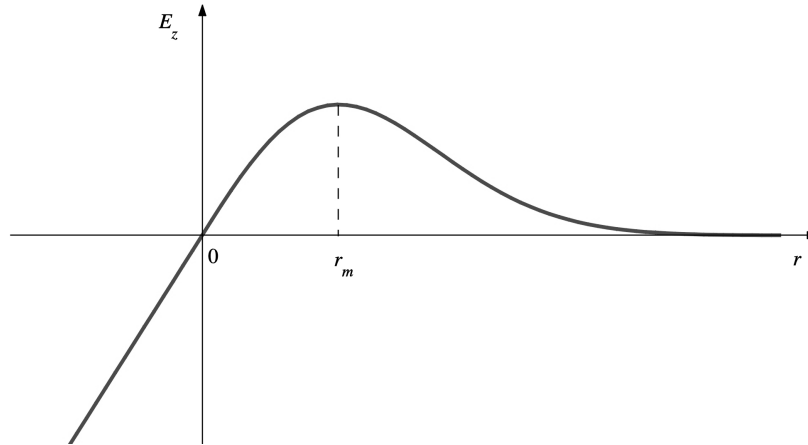
gdzie $E_z := \partial E_{ext} / \partial z$. Macierz \mathbf{A} jest macierzą pasmową o wymiarze $(n \cdot m) \times (n \cdot m)$ zestawianą na podstawie współczynników (7) zgodnie z równaniem (6). Można się łatwo przekonać, że jest ona macierzą osobliwą. Układ równań (8) rozwiązywany jest iteracyjnie

$$\mathbf{z}_t = (\mathbf{A} + \mathbf{I})^{-1} (\mathbf{z}_{t-1} + \mathbf{E}_{z, t-1}) \quad (9)$$

W t -tym kroku iteracji obliczane są wartości \mathbf{z}_t na podstawie energii zewnętrznej z poprzedniego kroku iteracji. Pochodną energii zewnętrznej obliczamy z zależności

$$\frac{\partial E_{ext}}{\partial z_t} = \begin{cases} r & \text{dla } r < 0, \\ re^{-r^2/\sigma^2} & \text{dla } r \geq 0, \end{cases} \quad (10)$$

gdzie r jest wartością odchyłki pomiędzy wysokością pomierzoną z_d a aproksymowaną z_t w t -tym kroku iteracji, $r := z_d - z_t$. Graficzną reprezentację tej funkcji pokazano na rysunku 2. Energia zewnętrzna jest proporcjonalna do odległości pomiędzy chwilowym położeniem funkcji aproksymującej a danymi pomiarowymi i powoduje „przyciąganie” funkcji do danych pomiarowych. Dla dodatnich r wartość ta jest tłumiona za pomocą funkcji Gaussa, i dzięki temu energia zewnętrzna oddziałuje tylko na niewielkich odległościach tworząc barierę dla błędów grubych. Wielkość tej bariery ustalana jest za pomocą parametru σ . Maksimum funkcji energii zewnętrznej znajduje się w punkcie $r_m = \sigma/\sqrt{2}$. Negatywne wartości r nie są tłumione – siła przyciągania generowana przez dane jest tym większa im wyżej ponad punktami pomiarowymi znajduje się funkcja aproksymująca. Taka definicja energii zewnętrznej zgodna jest ze strukturą danych skaningu laserowego, które charakteryzują się niesymetrycznym rozkładem błędów grubych. Definicja ta może być wykorzystana również dla innych celów, np. aby aproksymować górną powierzchnię lasu wystarczy zamienić stronami poszczególne składniki definicji (10).



Rys. 2. Energia zewnętrzna

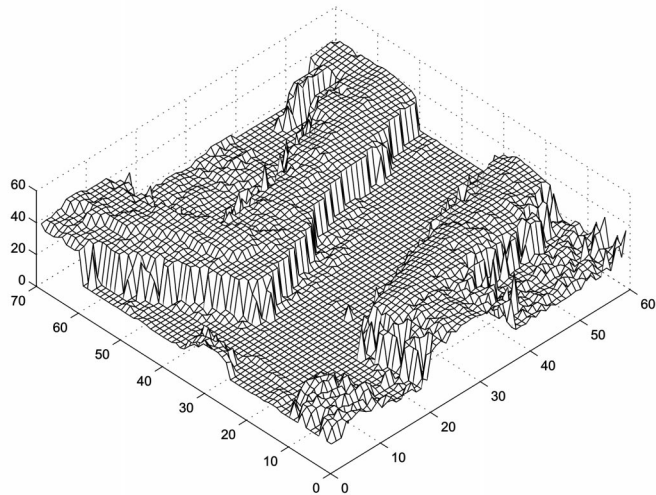
Przykład

Prezentowaną metodę zastosujemy teraz do filtracji rzeczywistych danych skaningu laserowego (rys. 3). Dane pozyskano z OEEPE Working Group on Laser Data Acquisition; (http://www.geomatics.kth.se/~fotogram/OEEPE/oeepe_laser_main.htm) przedstawiają fragment zabudowy miejskiej. Nieregularnie w płaszczyźnie rozproszone dane skaningu laserowego poddano interpolacji metodą najbliższego sąsiada na regularną siatkę kwadratów o boku równym średniej odległości poziomej pomiędzy najbliższymi punktami w zbiorze danych początkowych. Metoda interpolacji polega na przypisaniu do każdego węzła wysokości najbliższej położonego punktu pomiarowego.

Regularyzowane dane poddano następnie modelowaniu za pomocą prezentowanego algorytmu. Jako powierzchnię startową wybrano płaszczyznę leżącą na wysokości najwyższego punktu w zbiorze. Startową powierzchnię poddano następnie iteracyjnemu „dopasowaniu” do danych pomiarowych zgodnie z zależnością (9), przy czym energia zewnętrzna obliczana była w kolejnym kroku iteracji zgodnie z modelem (10) w każdym punkcie danych. Przyjęto następujące parametry sterujące: $\alpha = 1$, $\beta = 1$ i $\sigma^2 = 0,1$. Proces iteracyjny kończy się jeśli $z_i \approx z_{i-1}$.

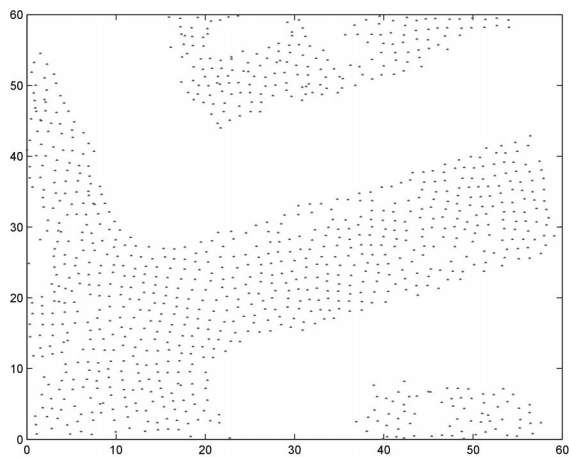
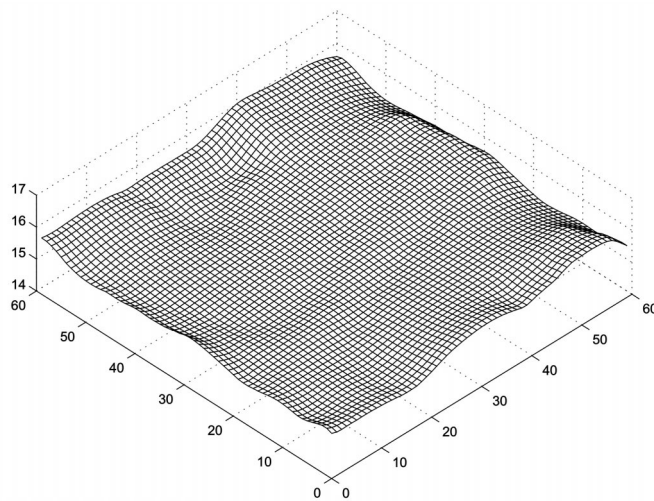
W wyniku modelowania otrzymuje się gładką reprezentację powierzchni terenu (rys. 4), wolną od obiektów znajdujących się ponad nią. Na obrzeżach modelowanego obszaru widoczne są pewne drobne defekty. Zjawisko to wynika z tego, że do rozwiązania równania różniczkowego potrzebne są warunki brzegowe. Można je zredukować poprzez dołączenie dodatkowych danych na obrzeżach opracowywanego obszaru.

W ostatnim etapie eliminowane są punkty zakwalifikowane jako obciążone błędami grubymi. W tym celu obliczana jest odległość punktu pomiarowego od modelowanej powierzchni. Jeśli wielkość ta przekracza dokładność wysokościową skaningu (lub jej wielokrotność) punkt jest eliminowany. Punkty zakwalifikowane jako terenowe pokazano na rysunku 5. Są to punkty leżące w odległości do 0,1 m do powierzchni modelu. Taki sam zbiór punktów otrzymano w wyniku ręcznej klasyfikacji punktów.



Rys. 3. Dane testowe

Rys. 4. Powierzchnia terenu modelowana za pomocą aktywnej powierzchni



Rys. 5. Punkty zakwalifikowane jako punkty terenowe

Zakończenie

Przedstawioną w niniejszej pracy metodę aproksymacji otrzymuje się w wyniku rozwiązania zadania wariacyjnego, w którym minimalizowane są określone właściwości geometryczne powierzchni wyrażone za pomocą gradientu (nachylenia) i krzywizny powierzchni oraz energia zewnętrzna opisująca rozbieżność pomiędzy danymi pomiarowymi a modelem. Zaproponowana, asymetryczna funkcja energii zewnętrznej pozwala uodpornić metodę na błędy grube skaningu laserowego.

Przeprowadzone testy numeryczne pokazały wysoką skuteczność prezentowanej metody, w szczególności w terenach zurbanizowanych zawierających duże kompleksy budowlane. Metoda sterowana jest za pomocą trzech swobodnych parametrów. Poprzez parametr σ definiowany jest zakres błędów grubych podlegających filtracji. Parametry α i β określają rozciągłość i sztywność modelowanej powierzchni. Im większe wartości tych parametrów tym większe naprężenie aktywnej powierzchni i większe jej właściwości filtracyjne. Dzięki temu w procesie iteracyjnym eliminowane są zarówno błędy grube jak i filtrowane błędy pomiaru. W zbiorach danych skaningu laserowego zdarzają się również odbicia leżące wyraźnie poniżej powierzchni terenu. Takie, błędne punkty pomiarowe powstają wskutek zjawiska wielotorowości. Tego typu błędy filtrowane są również dzięki odpowiedniej sztywności powierzchni.

Wysokości modelowanej powierzchni otrzymuje się z rozwiązania układu równań liniowych, w którym liczba równań jest równa licznie węzłów regularnej siatki ($n \times m$). Wynikają stąd trudności numeryczne. W przypadku danych skaningu laserowego, gdzie zbiory są rzędu 10^6 i więcej punktów, osiąga się szybko kres możliwości, nawet wydajnych komputerów. Rozwiązaniem tutaj jest odpowiednia segmentacja danych i stosowanie aproksymacji lokalnie, z odpowiednio dobranym obszarem wspólnym oraz zastosowanie efektywnych numerycznie algorytmów.

Oddzielnym zagadnieniem jest problem weryfikacji poprawności filtracji wykonanej prezentowaną metodą. Przeprowadzona filtracja ręczna, prezentowanego w pracy przykładu testowego, potwierdziła poprawność filtracji wykonanej metodą aktywnych powierzchni. W dalszej kolejności wykonana będzie analiza porównawcza prezentowanej i innych istniejących metod filtracji. Wykorzystane zostaną w tym celu dane lotniczego skaningu laserowego, wykonanego w ostatnim czasie na obszarze Wrocławia.

Literatura

- 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. XXXIV / 3A, 55-61.
- Borkowski A., Burkhardt D., Meier S., 1997: Zur optimalen Approximation von Höhenprofilen. *Österr. Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation*, 182-285.
- Borkowski A., 2004: Modellierung von Oberflächen mit Diskontinuitäten. *Deutsche Geodätische Kommission*, Reihe C, Heft Nr 575.
- Briese C., Pfeifer N., Dorninger P., 2002: Applications of the robust interpolation for DTM determination. *Symposium ISPRS Commission III, Photogrammetric Computer Vision, Graz, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV / 3A, 55-61.
- Bronstein I., Semendjajew K., 1962: Taschenbuch der Mathematik. B.G. Teubner, Leipzig.
- Elmqvist M., Jungert E., Persson A., Soderman U., 2001. Terrain modelling and analysis using laser scanner data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV-3/W4, Annapolis, Maryland, 219-227.

- Elmqvist M., 2002: Ground surface estimation from airborne laser scanner data using active shape models. ISPRS, Commission III, Symposium Photogrammetric Computer Vision, Graz, 114-118.
- Kass M., Witkin A., Terzopoulos D., 1987: Snakes: Active contour models. Proceedings of the First International Conference on Computer Vision, IEEE Comput. Soc. Press, 259-268.
- Kraus K., 2000: Photogrammetrie. Band 3. Topographische Informatonssysteme. Dümmler, Köln.
- Kraus K., Pfeifer N., 2001: Advanced DTM generatin from LIDAR data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV-3/W4, Annapolis, Maryland, 23-30.
- Marmol U., 2003: Pozyskiwanie numerycznego modelu powierzchni topograficznej (NMPT) w oparciu o dane wysokościowe pochodzące z lotniczego skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*. Vol. 13B, s. 419-426.
- Marmol U., Jachimski J., 2004: A FFT based method of filtering airborne laser scanner data. ISPRS Congress, Istanbul, Commision3. <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, 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, 203-210.
- Sithole G., Vosselman G., 2003: Report ISPRS: Comparison of filters, <http://www.isprs.org/commission3/wg3>.
- 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.

Summary

Laser scanner data sets contain a considerable number of gross errors which are reflections from objects that lie above the terrain surface, i.e. trees, houses. If Digital Terrain Model is interpolated such points need to be removed from data files. For automatic filtering of gross errors an algorithm based on active surface model (flakes) was proposed. This model constitutes a variational problem solution in which total energy comprising external and internal energy is minimized. Internal energy describes geometric properties of modelled surface and, it is the weighted sum of its inclination and curvature. External energy measures the deviation of the model from the given data. The Euler equation that is equivalent to variational problem is discretized with finite difference method and solved iteratively.

A model for external energy that enables to make flakes robust to gross errors was formulated. Filtering features of the method were presented on the laser scanner data. Hints for practical application of presented method were given.

dr hab. inż. Andrzej Borkowski
borkowski@ar.wroc.pl