

**MODELOWANIE LINII KRAWĘDZIOWYCH POWIERZCHNI NA PODSTAWIE  
DANYCH SKANINGU LASEROWEGO**

**SURFACE BREAKLINES MODELING ON THE BASIS  
OF LASER SCANNING DATA**

**Andrzej Borkowski**

Instytut Geodezji i Geoinformatyki, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

**SŁOWA KLUCZOWE:** skaningu laserowego, linia krawędziowa, aktywne kontury, funkcja sklejana o minimalnej krzywiznie

**STRESZCZENIE:** W wielu zastosowaniach istotnym elementem jest informacja o położeniu linii krawędziowych powierzchni. Skanowanie laserowe, zarówno z pokładu samolotu jak i naziemne, jest źródłem szczegółowej informacji o skanowanej powierzchni. Źródłowa informacja ma postać zbioru punktów  $\{x, y, z\}$  o nieregularnym rozkładzie w płaszczyźnie  $xy$  i dużym zagęszczeniu, od kilku punktów, w przypadku lotniczego skaningu laserowego do tysiąca punktów na metr kwadratowy w przypadku skanowania naziemnego. Duże zagęszczenie informacji punktowej pozwala na modelowanie (w postaci wektorowej) linii krawędziowych powierzchni.

W pracy przedstawiono algorytm modelowania linii krawędziowej, jako linii przecięcia dwóch powierzchni. Zakładając aproksymację danych skaningu laserowego po prawej i lewej stronie modelowanej linii krawędziowej funkcją postaci  $z_1 = f_1(x, y)$  i  $z_2 = f_2(x, y)$  odpowiednio, zadanie wyznaczenia w postaci wektorowej krzywej przecięcia  $[x(s), y(s), z(s)]^T$ , gdzie  $s$  jest bieżącym parametrem długości krzywej, powierzchni  $z_1$  i  $z_2$  sprowadza się do wyznaczenia rzutu tej krzywej na płaszczyznę  $xy$ . Wysokość  $z$  zostanie wyznaczona po wstawieniu współrzędnych  $\{x, y\}$  zrzutowanej krawędzi do któregoś z równań powierzchni. W prezentowanym algorytmie przebieg linii krawędziowej w płaszczyźnie  $xy$  wyznacza się z wykorzystaniem metody aktywnych konturów (*snakes*), przy czym energia zewnętrzna w modelu *snakes* zdefiniowana jest jako proporcjonalna do odległości pomiędzy obydwo ma powierzchniami w aktualnym położeniu aktywnego konturu. Jako funkcję aproksymującą,  $f_i(x, y)$ ,  $i=1,2$ , wykorzystano w pracy funkcję sklejaną o minimalnej krzywiznie (*thin plate spline*). Prezentowany algorytm zastosowano do danych rzeczywistych. Dokładność modelowania linii krawędziowych oszacowano na podstawie bezpośrednich pomiarów terenowych.

## 1. WPROWADZENIE

W wielu zastosowaniach istotnym elementem jest informacja o położeniu linii krawędziowych powierzchni. Przykładem mogą być precyzyjne numeryczne modelu terenu (NMT) budowane dla potrzeb modelowania hydrodynamicznego.

Skanowanie laserowe, zarówno z pokładu samolotu jak i naziemne, jest źródłem szczegółowej informacji o skanowanej powierzchni. Źródłowa informacja ma postać zbioru punktów  $\{x, y, z\}$  o nieregularnym rozkładzie w płaszczyźnie  $xy$  i dużym zagęszczeniu, od

kilku punktów, w przypadku lotniczego skaningu laserowego do tysiąca punktów na metr kwadratowy w przypadku skanowania naziemnego. Duże zagęszczenie informacji punktowej pozwala na modelowanie (w postaci wektorowej) linii krawędziowych powierzchni. W przypadku prostych powierzchni analitycznych modelowanie takie nie nastręcza trudności. W przypadku nieregularnych powierzchni o skomplikowanej strukturze, na przykład powierzchni terenu, zadanie się komplikuje.

Możliwość modelowania linii krawędziowych powierzchni terenu na podstawie danych lotniczego skaningu laserowego pojawiła się po tym jak technologia ta osiągnęła odpowiednią rozdzielczość – rzędu jeden punkt na metr kwadratowy.

Pierwsze próby w tym zakresie sprowadzały się do interpolacji wysokości na gęstej siatce kwadratów, którą, po odpowiedniej kwantyzacji, traktowano jako obraz cyfrowy. Stosując następnie standardowe metody cyfrowego przetwarzania obrazów identyfikowano położenie linii krawędziowych (Brügelmann, 2000; Sui, 2002, 2003). Rozwiązanie takie trzeba uznać za uproszczone. Trójwymiarowe modelowanie linii krawędziowych w postaci wektorowej możliwe jest bowiem tylko na podstawie oryginalnych danych.

Algorytm trójwymiarowego modelowania linii krawędziowych przedstawiono w pracach (Briese, 2004a, 2004b). W omawianym algorytmie punkty pomiarowe wzdłuż linii krawędziowej klasyfikowane są na punkty leżące po prawej i po lewej stronie przypuszczalnego przebiegu krawędzi w płaszczyźnie  $xy$ . Dodatkowo punkty sortowane są w nakładające się na siebie niewielkie podobszary po lewej i prawej stronie krawędzi  $K$ . W każdym podobszarze punkty aproksymowane są, metodą najmniejszych kwadratów, płaszczyzną. Krawędź przecięcia dwóch sąsiadujących, po obu stronach  $K$ , ze sobą płaszczyzn jest styczną do  $K$ . Punkt styczności jest jednak nieznany. Dlatego wybiera się reprezentatywny punkt w środku. Punkty te są następnie łączone ze sobą za pomocą funkcji sklepanych. Na etapie aproksymacji danych płaszczyzną możliwa jest w tym algorytmie eliminacja błędów grubych poprzez zastosowanie aproksymacji odpornej.

W pracach (Borkowski 2004; Borkowski i Keller 2005) przedstawiono algorytmy trójwymiarowego modelowania linii krawędziowych jako linii przecięcia dwóch powierzchni. Tradycyjnie linię krawędzią otrzymuje się w wyniku rozwiązania odpowiedniego równania różniczkowego. W pracy przedstawiono algorytm wykorzystujący technikę aktywnego konturu (*snakes*) do identyfikacji linii przecięcia powierzchni. Rozszerzono ponadto funkcjonalność algorytmu o moduł klasyfikacji punktów, będących podstawą modelowania. Przeprowadzono analizę algorytmu w odniesieniu do rozwiązań tradycyjnych.

## 2. KRAWĘDŹ JAKO LINIA PRZECIĘCIA DWÓCH POWIERZCHNI

Zakładamy, że chmura punktów została podzielona na dwa podzbiory punktów leżących po prawej i po lewej stronie poszukiwanej krawędzi. Ponadto usunięte zostały punkty nie będące odbiciami od modelowanej powierzchni. Dane w obydwu podzbiorach aproksymowane są powierzchniami postaci:  $z_1 = f_1(x, y)$  i  $z_2 = f_2(x, y)$ . Wyznaczenie, w postaci wektorowej  $[x(s) \ y(s) \ z(s)]^T$ , krzywej wzdłuż której nastąpi przecięcie dwóch powierzchni sprowadza się do wyznaczenia położenia tej krzywej w płaszczyźnie  $xy$ ,  $[x(s) \ y(s)]^T$ . Trzecią składową wektora,  $z(x)$ , wyznaczymy wstawiając współrzędne  $[x(s) \ y(s)]^T$  do któregoś z równań powierzchni,  $z(s) = f_1(x(s), y(s)) = f_2(x(s), y(s))$ . Dla krzywej przecięcia dwóch powierzchni zachodzi bowiem zależność:

$$(1) \quad F(x(s), y(s)) = f_2(x(s), y(s)) - f_1(x(s), y(s)) = 0.$$

Warunek (1) może być zapisany w postaci równania różniczkowego,

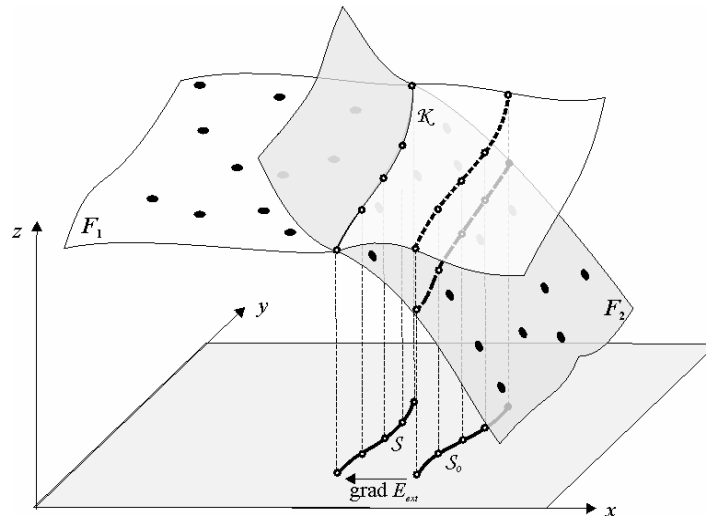
$$(2) \quad \frac{\partial}{\partial s} F(x(s), y(s)) = F_x(x(s), y(s)) \frac{dx}{ds} + F_y(x(s), y(s)) \frac{dy}{ds} = 0,$$

które rozwiązuje się numerycznie, stosując najczęściej metodę *Runge-Kutta* ze stałym krokiem dyskretyzacji. Rozwiązanie numeryczne wiąże się z pewnymi ograniczeniami:

- wymaga dokładnego ustalenia punktu startowego,
- błędy narastają wraz z odległością od punktu startowego.

Problemów tych można uniknąć stosując metodę aktywnych konturów do identyfikacji położenia linii przecięcia powierzchni.

Model aktywnego konturu (*snakes*) wprowadzony został w pracy (Kass et. al., 1987). Szczegółową analizę metody oraz problemy związane z realizacją numeryczną podano między innymi w (Borkowski, 2004). Model aktywnego konturu jest rozwiązaniem zadania wariacyjnego, w którym minimalizowana jest energia krzywej, będąca sumą energii wewnętrznej opisującej geometrię krzywej oraz energii zewnętrznej zależnej od danych i konkretnego zastosowania.



Rys. 1. Identyfikacja położenia linii przecięcia powierzchni za pomocą aktywnego konturu

Ideę wyznaczenia położenia krzywej przecięcia dwóch powierzchni przedstawiono na rysunku (Rys. 1). Początkowe położenie aktywnego konturu  $S_0$  wybierane jest dowolnie. Obecność energii zewnętrznej powoduje przemieszczanie się, w iteracyjnym procesie obliczania kolejnego położenia, aktywnego konturu w kierunku malejącej energii

zewewnętrznej. Po osiągnięciu równowagi pomiędzy energią zewnętrzną a wewnętrzną proces iteracyjny zostaje zatrzymany.

W rozpatrywanym zadaniu energię zewnętrzną definiujemy proporcjonalnie do kwadratu odległości pomiędzy powierzchniami,

$$(3) \quad E_{ext} \propto \frac{\mu}{2}(z_2 - z_1)^2,$$

gdzie  $\mu$  jest dodatkowym współczynnikiem wagowym.

### 3. ALGORYTM

Kluczowym zagadnieniem w procesie modelowania linii krawędziowej jest właściwa klasyfikacja punktów leżących po obydwu stronach modelowanej krawędzi. (Briese, 2004a, 2004b) stosuje w tym celu metody cyfrowego przetwarzania obrazów (identyfikacji krawędzi), a błędną klasyfikację punktów w pobliżu linii krawędziowej koryguje stosując odporne metody estymacji.

W prezentowanym w niniejszej pracy wariantcie algorytmu klasyfikacja punktów odbywa się jednocześnie na etapie aproksymacji danych modelem funkcyjnym powierzchni. Algorytm klasyfikacji realizowany jest iteracyjnie:

1. w każdym z podobszarów  $T_i$ ,  $i=1,2$ , wybierane są przez operatora co najmniej trzy punkty,
2. na podstawie punktów należących do  $T_i$  tworzona jest figura wypukła  $\Omega_i$  i wszystkie punkty leżące wewnątrz  $\Omega_i$  kwalifikowane są do  $T_i$ ,
3. na podstawie punktów należących do  $T_i$  konstruowana jest powierzchnia aproksymacyjna  $f_i$ ,
4. każdy z podobszarów  $T_i$  powiększany jest o nowy punkt  $P_j$ ,  $j=1,2,\dots,n$ , który spełnia warunek:

$$\min\{dist(\Omega_i, P_j)\}; \quad i = 1,2; \quad j = 1,2,\dots,n$$

i jednocześnie

$$\min\{dist(f_i, P_j)\}; \quad i = 1,2 \quad j = 1,2,\dots,n,$$

5. powrót do punktu 3, jeśli  $j < n$ .

Jako powierzchnia aproksymacyjna może być wybrana dowolna funkcja postaci  $z = f(x,y)$ . W prezentowanym algorytmie wykorzystywana jest funkcja sklejana o minimalnej krzywiznie (*thin plate spline*) (Duchon, 1976),

$$(4) \quad z(x, y) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \lambda_i r_i^2 \ln r_i^2 + v_{00} + v_{01}x + v_{10}y,$$

gdzie  $r_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2$  a  $\lambda_i$  oraz  $v$  są parametrami funkcji. Parametry te wyznacza się na podstawie danych pomiarowych  $\{x, y, h\}$  w wyniku rozwiązania układu równań postaci:

$$(5) \quad \begin{bmatrix} \sigma_1 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} & 1 & x_1 & y_1 \\ a_{21} & \sigma_2 & a_{23} & \cdots & a_{2n} & 1 & x_2 & y_2 \\ a_{31} & a_{32} & \sigma_3 & \cdots & a_{3n} & 1 & x_3 & y_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & \sigma_n & 1 & x_n & y_n \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & x_2 & x_3 & \cdots & x_n & 0 & 0 & 0 \\ y_1 & y_2 & y_3 & \cdots & y_n & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ v_{00} \\ v_{01} \\ v_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ \vdots \\ h_n \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

gdzie  $a_{ij} = \frac{1}{2} r_{ij}^2 \ln r_{ij}^2$ ,  $i=1,2,\dots,n$ ;  $j=1,2,\dots,n$ .

Wielkości  $\sigma_i$ ,  $i=1,2,\dots,n$  na głównej przekątnej w równaniu (5) charakteryzują dokładność wpasowania funkcji sklejaną do danych pomiarowych, choć nie są w bezpośrednim związku z dokładnością tych danych. Najczęściej przyjmuje się jedną wartość  $\sigma$  dla wszystkich punktów. Wielkość tę dobiera się na drodze eksperymentalnej. W szczególności można przyjąć  $\sigma=0$ , wówczas funkcja sklejana (4) będzie funkcją interpolacyjną.

Po wyznaczeniu parametrów funkcji sklejaną oblicza się pochodne cząstkowe energii zewnętrznej (3):

$$(6) \quad \mathbf{E}_v = \begin{bmatrix} \frac{\partial E_{ext}}{\partial x} \\ \frac{\partial E_{ext}}{\partial y} \end{bmatrix} = \mu(z_2 - z_1) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_2(x, y)}{\partial x} - \frac{\partial f_1(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial f_2(x, y)}{\partial y} - \frac{\partial f_1(x, y)}{\partial y} \end{bmatrix},$$

$$(7) \quad \frac{\partial f}{\partial x} = \sum_{i=1}^n \lambda_i (x - x_i) (\ln r_i^2 + 1) + v_{01},$$

$$(8) \quad \frac{\partial f}{\partial y} = \sum_{i=1}^n \lambda_i (y - y_i) (\ln r_i^2 + 1) + v_{10}.$$

Ostatecznie, wyznacza się iteracyjnie współrzędne  $\mathbf{v}=[x(s) \ y(s)]^T$  aktywnego konturu,

$$(9) \quad \mathbf{v}_t = (\mathbf{A} + \gamma \mathbf{I}) (\gamma \mathbf{v}_{t-1} - \mathbf{E}_v|_{t-1}),$$

gdzie  $\mathbf{I}$  jest macierzą jednostkową,  $t$  kolejnym krokiem iteracji a  $\gamma$  parametrem regularyzacji, najczęściej równym jeden. Macierz  $\mathbf{A}$ ,

$$(10) \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a & b & c & 0 & 0 & 0 & \dots \\ b & a & b & c & 0 & 0 & \dots \\ c & b & a & b & c & 0 & \dots \\ 0 & c & b & a & b & c & \dots \\ 0 & 0 & c & b & a & b & \dots \\ 0 & 0 & 0 & c & b & a & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix},$$

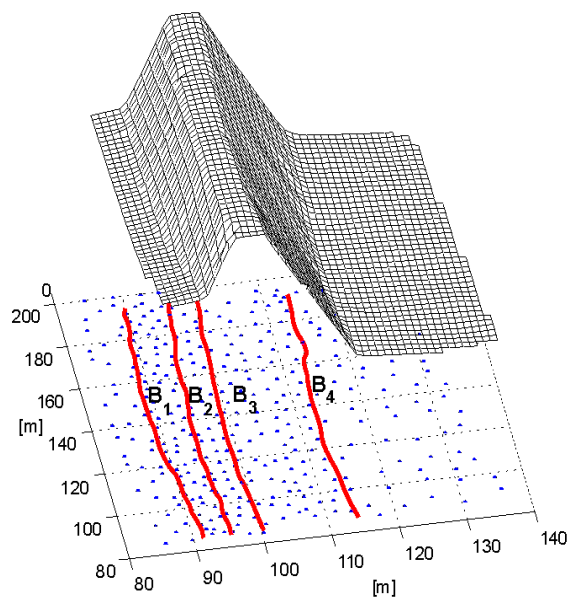
gdzie

$$a := 2\alpha + 6\beta \quad b := -\alpha - 4\beta \quad c := \beta,$$

opisuje właściwości geometryczne modelowanej krzywej (energię wewnętrzną), które mogą być dowolnie kształtowane poprzez odpowiedni dobór parametrów  $\alpha$  oraz  $\beta$ .  $a$  jest parametrem wagowym pierwszej pochodnej a  $\beta$  drugiej pochodnej krzywej.

#### 4. PRZYKŁADY

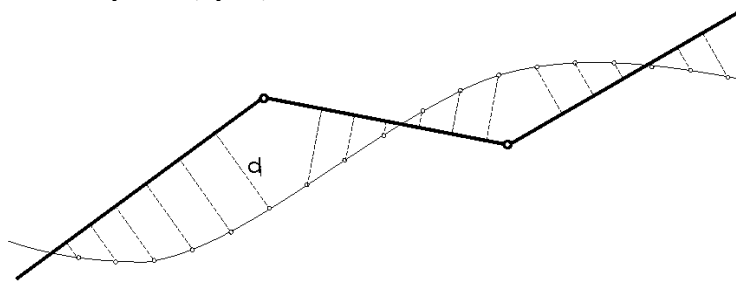
Skuteczność modelowania linii krawędziowych za pomocą prezentowanego algorytmu pokazana zostanie na przykładzie fragmentu wału przeciwpowodziowego rzeki Odry, przedstawionym na rysunku (Rys. 2).



Rys. 2. Przykład testowy: fragment wału przeciwpowodziowego Odry

Jest to fragment nowo wybudowanego wału, z jednoznacznie identyfikowalnymi krawędziami. Ponieważ fragment ten znajdował się poza terenem wykonanego skanowania laserowego, wykonano dla omawianego fragmentu pomiar tachimetryczny nieregularnie rozrzuconych punktów o zagęszczeniu około jeden punkt na metr kwadratowy, symulując w ten sposób skaningu laserowy. Ponadto, w terenie zidentyfikowano i wykonano oddzielnie pomiar tachimetryczny czterech linii krawędziowych. Te same linie wymodelowano na podstawie nieregularnie rozrzuconych punktów pomiarowych, z wykorzystaniem proponowanego algorytmu. Na rysunku (Rys. 2) pokazano rozkład punktów pomiarowych w płaszczyźnie  $xy$  oraz rzut wymodelowanych linii krawędziowych na płaszczyznę  $xy$ .

Wyniki modelowania porównano z wynikami pomiarów bezpośrednich. Obliczono różnice wysokości pomiędzy pomierzoną a otrzymaną z modelowania krzywą oraz odległość obydwu krzywych od siebie w płaszczyźnie  $xy$ . Sposób obliczenia tej ostatniej zilustrowano na rysunku (Rys. 3).



Rys. 3. Oszacowanie dokładności w płaszczyźnie  $xy$ . Krawędź pomierzona (gruba linia) i krawędź otrzymana na podstawie modelowania (cienka linia)

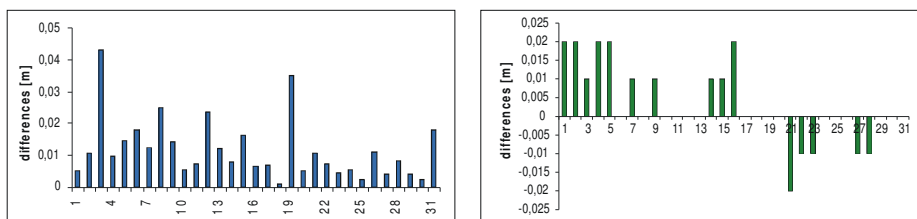
Na podstawie wyników porównania zestawiono w tabeli (Tab.1) maksymalną odległość poziomą  $d_{max}$  pomiędzy obydwoma krzywymi, odległość średnią  $d_{sr}$  oraz odchylenie standardowe  $\sigma_d$  odległości poziomych. Takie same charakterystyki dokładnościowe podano dla wysokości. Z analizy zestawionych danych wynika, że błąd wysokości wymodelowanej krawędzi kształtuje się na poziomie błędów pomiaru, natomiast położenie poziome krawędzi wyznaczone jest z błędem około rząd wielkości gorszym.

**Tab 1.** Zestawienie charakterystyk dokładnościowych dla modelowanych krawędzi (wartości w metrach)

	$d_{max}$	$d_{sr}$	$\sigma_d$	$\Delta z_{max}$	$\Delta z_{sr}$	$\sigma_z$
B <sub>1</sub>	0.51	0.18	0.11	0.06	0.00	0.03
B <sub>2</sub>	0.55	0.20	0.15	0.09	0.03	0.02
B <sub>3</sub>	0.31	0.11	0.09	0.12	0.04	0.03
B <sub>4</sub>	0.49	0.19	0.13	-0.12	-0.04	0.04

W pracy (Borkowski i Ziemia, 2006) przedstawiono wyniki modelowania krawędzi urządzenia technicznego na podstawie danych naziemnego skanowania laserowego. Urządzenie techniczne (symulator koparki) zeskanowano skanerem Riegl LMS-Z420i,

o dokładności pomiaru odległości  $\pm 10$  mm. Wyniki modelowania linii krawędziowych porównano z wynikami pomiaru bezpośredniego, metodą tachimetryczną (por. Rys. 4). Odchyłki, w kolejnych punktach pomierzonej krawędzi, w płaszczyźnie  $xy$  obliczono w sposób zobrazowany na rysunku 3, odchyłki wysokościowe to różnice współrzędnych z modelowanej i pomierzonej krawędzi.



Rys. 4. Odchyłki pomiędzy modelowaną a pomierzoną krawędzią w płaszczyźnie  $xy$  (po lewej) i wysokości (po prawej) w kolejnych punktach linii krawędziowej (Borkowski i Ziemia, 2006)

Tutaj również dokładności wyznaczenia przebiegu linii krawędziowej kształtują się na poziomie dokładności skanowania laserowego. Nie jest natomiast wyraźnie widoczna różnica dokładności w wysokości i w płaszczyźnie poziomej. Wynika to prawdopodobnie z jednoznaczności skanowanej powierzchni.

## 5. PODSUMOWANIE

W wielu zastosowaniach praktycznych przydatna jest wiedza o przestrzennym położeniu linii krawędziowych powierzchni. W pracy zaproponowano algorytm wyznaczania linii krawędziowej jako linii przecięcia dwóch powierzchni. Do opisu funkcjonalnego powierzchni wykorzystano funkcję sklejaną o minimalnej krzywiznie. Położenie krzywej przecięcia powierzchni wyznaczono za pomocą modelu aktywnego konturu, do którego wprowadzono energię zewnętrzną proporcjonalną do kwadratu odległości pomiędzy powierzchniami, w aktualnym położeniu aktywnego konturu. W porównaniu do rozwiązań klasycznych, bazujących na numerycznym rozwiązaniu równań różniczkowych, zaproponowany algorytm charakteryzuje się:

- jednolitą dokładnością wzdłuż krzywej (nie ma narastania błędów),
- dowolnością wyboru startowego położenia aktywnego konturu; brakiem konieczności precyzyjnej identyfikacji punktu startowego,
- szybką zbieżnością procesu iteracyjnego.

W procesie aproksymacji danych modelem funkcyjnym powierzchni realizowana jest jednocześnie klasyfikacja punktów do odpowiednich podzbiorów zawierających punkty po lewej i po prawej stronie modelowanej krawędzi.

Na dokładność modelowania krawędzi wpływa szereg czynników:

- rodzaj krawędzi, jednoznaczność jej identyfikacji oraz kształt,
- kąt, pod którym powierzchnie się przecinają,
- dokładność danych punktowych (dokładność skaningu),
- zagęszczenie danych.



Przeprowadzone eksperymenty numeryczne pokazały, że czynniki te w mniejszym stopniu wpływają na dokładność wysokościową wyznaczenia krawędzi. Dokładność wysokościowa kształtuje się na poziomie dokładności pomiaru i jest znacznie lepsza niż dokładność w płaszczyźnie  $xy$ . Na dokładność wyznaczenia rzutu krawędzi na płaszczyznę  $xy$  znaczny wpływ ma kąt przecięcia powierzchni.

W zastosowaniach topograficznych najważniejszym podejściem będzie zatem wyznaczenie położenia  $xy$  krawędzi na podstawie ortoobrazów a wysokości na podstawie danych skanowania laserowego. W terenach zalesionych, kiedy nie ma możliwości identyfikacji linii krawędziowych powierzchni terenu na zdjęciach, modelowanie na podstawie danych skanowania laserowego pozostaje jedyną możliwością.

## 6. LITERATURA

- Borkowski A., 2004. Modellierung von Oberflächen mit Diskontinuitäten. *Deutsche Geodätische Kommission*, Reihe C, Heft Nr 575.
- Borkowski A., Keller W., 2005. Global and local method for tracking the intersection curve between two surfaces. *Journal of Geodesy* vol. 79 pp. 1-10
- Borkowski A., Ziemia E., 2006. Surface breaklines interpolation on the basis of terrestrial laser scanning data. *Reports on Geodesy*, No 2(77), pp. 95-102.
- Breise C., 2004a. Three-dimensional modelling of breaklines from airborne laser scanner data. *ISPRS Congress, 12-23 July, Istanbul, Turkey, Commission 3*. <http://www.isprs.org/commission3/wg3>
- Breise C., 2004b. *Breakline modeling from airborne laser scanner data*. Dissertation TU Wien.
- Brügelmann R., 2000. Automatic breaklines detection from airborne laser scanner data. *Int. Arch. Photogrammetry and Remote Sensing XXXIII(B3)*, pp. 109-116.
- Duchon J., 1976. Interpolation des fonctions de deux variables suivant le principe de la flexion des plaques minces. *R.A.I.R.O. Analyse Numerique* 10, pp 47-52.
- Kass M., Witkin, A. Terzopoulos D., 1987. Snakes: Active contour models. *Proceedings of the First International Conference of Computer Vision*, IEEE Comput. Soc. Press, 259-268.
- Sui L., 2002. Ableitung topographischer Strukturlinien aus Laserscannerdaten mit Methoden der Bildverarbeitung. *Zeitschrift für Photogrammetrie, Fernerkundung, Geo-information*, S. 423-434.
- Sui L., 2003. Auswertung von Laserscannerdaten und automatische Ableitung von Strukturlinien mit digitalen Bildverarbeitungsmethoden. *ZfV - Zeitschrift für Geodäsie, Geo-information und Landmanagement*, S. 318-325.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2005-2007 jako projekt badawczy nr 4T12E01729. Obliczenia wykonano w systemie MATLAB, licencja nr 101979, grant obliczeniowy Wrocławskiego Centrum Sieciowo-Superkomputerowego

## **SURFACE BREAKLINES MODELING ON THE BASIS OF LASER SCANNING DATA**

KEY WORDS: laser scanning, breakline, snakes, thin plate spline

SUMMARY: The location of edge lines is a key issue for numerous applications. Laser scanning, airborne as well as terrestrial deliver information about scanned surfaces. Source information has the character of a set of points  $\{x, y, z\}$  with irregular  $xy$  plane distribution. In case of using airborne laser scanners, the density of points per square meter ranges from a few points to thousand points, when using terrestrial laser scanners. The great density of discrete information allow to model (as a vector) the edge lines of the surfaces.

In the present study, the algorithm for modeling edge lines as an intersection of two surfaces was presented. These surfaces were approximated from laser scanning data using the  $z_1=f_1(x,y)$  and  $z_2=f_2(x,y)$  functions (adequate on left and right side of edge line). The task of determination a vector  $[x(s), y(s), z(s)]^T$  (intersection curve), where  $s$  parameter of curve length were solved as projection of the curve onto plane  $xy$ . Height  $z$  was calculated after substitution of  $\{x,y\}$  coordinates in equation of any surface. In the algorithm presented, the plane  $xy$  location of edge line was determined using active contour (snakes) method. The external energy of snakes model was defined proportional to the distance between both surfaces of actual place of active contour. In the present paper, thin plate spline functions were chosen as a function  $f_i(x,y)$ ,  $i=1,2$  of approximation. The algorithm presented was tested with real data. The accuracy of edge line modeling was estimated based on direct field measurements.

dr hab. inż. Andrzej Borkowski, prof. nadzw  
e-mail: borkowski@kgf.ar.wroc.pl  
telefon: 071-3205609