

## ESTYMACJA OBJĘTOŚCI OBIEKTÓW O ZŁOŻONEJ GEOMETRII NA PODSTAWIE POMIARÓW NAZIEMNYM SKANINGIEM LASEROWYM

### VOLUME ESTIMATION OF OBJECT WITH COMPLEX GEOMETRY BASED ON TERRESTRIAL LASER SCANNING

Przemysław Tymków

Instytut Geodezji i Geoinformatyki, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

SŁOWA KLUCZOWE: naziemny skaniny laserowy, modelowanie 3D, algorytmy modelowania, convex-hull, geometria obliczeniowa, bliski zasięg, TLS, GIS 3D

STRESZCZENIE: W pracy przedstawiono propozycję automatycznej metody zgrubnego modelowania 3D obiektów o skomplikowanej geometrii na potrzeby szybkiej estymacji parametrów geometrycznych tych obiektów, a zwłaszcza objętości. Badania w terenie obejmowały wykonanie pomiarów skanerem laserowym zabytkowej kutej kraty stanowiącej osłonę studni w Nysie (woj. opolskie). Przedstawiona metodyka modelowania opiera się o warstwową metodę *convex-hull*, która zakłada podział chmury punktów pomiarowych na segmenty. W obrębie każdego segmentu dokonywana jest segmentacja w oparciu o minimalne odległości między punktami. Otrzymane zbiory punktów modelowane są następnie jako bryły wypukłe. Dzięki zastosowaniu segmentacji chmury punktów w każdym segmencie oraz integracji uzyskanych otoczek wypukłych uzyskano model obiektu, który umożliwia oszacowanie takich parametrów geometrycznych jak objętość i pole powierzchni obiektu. Zaletą proponowanej metody jest ograniczenie liczby parametrów do dwóch: grubości segmentu oraz parametru maksymalnej odległości między punktami w procesie segmentacji chmury w obrębie segmentu. Dzięki zastosowaniu metody *convex-hull* dokonywana jest selektywna filtracja punktów dzięki czemu model 3D oparty jest na znacznie mniejszej liczbie wertsów i trójkątów niż początkowa liczba punktów w chmurze. Wadą proponowanego algorytmu jest natomiast nieregularność siatki trójkątów wpływająca na gładkość powierzchni oraz wrażliwość na błędy pomiarowe.

#### 1. WPROWADZENIE

Wykorzystanie technologii 3D w systemach GIS i widzeniu maszynowym (ang. *computer vision*) coraz częściej wymaga precyzyjnego opisu geometrii obiektów występujących w przestrzeni. Wiele elementów budynków i budowli posiada złożoną strukturę, przez co modelowanie ich często sprowadza się do uproszczeń kształtów oraz zastąpienia mikrostruktury obrazem tekstury. Podejście takie jest zazwyczaj wystarczające do wizualizacji, uniemożliwia jednak precyzyjne pomiary geometrii takich obiektów. Technologia naziemnego skaniny laserowego dzięki swojej precyzji i rozdzielczości przestrzennej umożliwia odtworzenie geometrii nawet bardzo skomplikowanych i niewielkich obiektów. Wymaga to jednak zastosowania złożonych algorytmów

rekonstruujących geometrię na podstawie chmury punktów lub czasochłonnych prac kameralnych. Niemniej jednak wyniki opracowań inżynierskich, zwłaszcza tych opartych na pomiarach bezpośrednich i skaningu naziemnym znajdują zastosowania w wizualizacji w portalach informacyjnych miast i regionów. Powoduje to niestety wzrost kosztów takich opracowań i ma uzasadnienie jedynie wtedy, gdy produkty te poza wizualizacją służyć mają także innym celom, gdzie dokładność i szczegółowość jest niezbędna. Istnieje zatem przestrzeń pomiędzy pracami na potrzeby wizualizacji w serwisach internetowych, w których precyzja i szczegółowość na poziomie geodezyjnych pomiarów inżynierskich nie jest wymagana a pomiarami, których celem jest inwentaryzacja geometrii z wysoką dokładnością. Przestrzeń ta wypełniana jest modelami i bibliotekami modeli uzyskanymi w drodze manualnego lub coraz częściej automatycznego modelowania 3D (Awrangjeb *et al.*, 2010; Dorniger i Pfeifer, 2008) o szczegółowości na poziomie LoD3 i dokładnością na poziomie decymetrowym oraz metadanymi z dokładnymi danymi geometrycznymi. Dotyczy to zwłaszcza obiektów o złożonej geometrii, to znaczy takich, gdzie genus modelu, czyli liczba otworów w różnorodności topologicznej, jest znacznie większa od 0. Przykładem takiego modelu jest model Pięknej Studni w Nysie (woj. opolskie), wykonany na potrzeby realizacji systemu informacji przestrzennej i portalu informacyjno-promocyjnego Województwa Opolskiego „Opolskie w Internecie”.

Studnia w Nysie jest obiektem unikatowym i uznawanym za arcydzieło barokowej sztuki kowalskiej (rys. 1a). Dekorację kraty stanowią liczne motywy roślinne, zwierzęce i fantazyjne, których inspiracją jest woda. Wizualizację 3D studni znaleźć można w serwisie internetowym województwa opolskiego ([www.mapy.opolskie.pl](http://www.mapy.opolskie.pl)) (rys. 1b).



Rys. 1. a) „Piękna studnia w Nysie”, b) Wizualizacja modelu w systemie informacji przestrzennej i portalu informacyjno-promocyjnym województwa opolskiego ([www.mapy.opolskie.pl](http://www.mapy.opolskie.pl))

Model ten wykonany został jako model bryłowy, a szczegóły prezentowane są w formie tekstury. Ze względu na złożoność geometrii, bogactwo detali i ich niewielkie rozmiary do

celów inwentaryzacyjnych najlepszą obecnie technologią pomiaru jest naziemny skanowanie laserowe. Dzięki pozyskanej chmurze punktów dostępna jest informacja o geometrii obiektu, jednak pomiar parametrów geometrycznych takich jak np. objętość obiektu w zbiorze punktów stanowi problem.

W niniejszym artykule podjęto próbę zbadania w jakim zakresie i z jaką dokładnością można automatycznie wyznaczyć parametry geometryczne obiektu architektonicznego o złożonej geometrii pomierzonego naziemnym skanowaniem laserowym. W pracach wykorzystano modyfikację metody modelowania obiektów o złożonej geometrii na podstawie zbioru współrzędnych punktów  $\{x,y,z\}$  opartą o algorytm *Multi Convex Hull* (Tymków i Borkowski, 2009).

## 2. ALGORYTM MODELOWANIA

### 2.1. Założenia metody

Proponowana metoda modelowania opiera się na ogólnym założeniu, że modelowany obiekt może być przedstawiony jako unia elementów wypukłych. W inżynierii odwrotnej (ang. *reverse engineering*) dekompozycja na elementy wypukłe jest zagadnieniem dobrze przestudiowanym i opisanym (np. Keil, 2000). Podejście to znajduje szereg zastosowań, ze względu na fakt, że wiele algorytmów upraszcza się lub przyśpiesza swoje działanie, jeżeli operują wyłącznie na elementach wypukłych (Lien *et. al.*, 2007; Igarashi *et. al.*, 2011).

Celem proponowanej metody jest wykonanie dekompozycji zbioru punktów pomiarowych skaningu laserowego  $\{p_i\}$  na  $n$  podzbiorów, które następnie są modelowane jako elementy wypukłe. Oznaczmy te modele symbolem  $P_i$ . W tym celu dokonywana jest segmentacja chmury punktów na segmenty poprzez podział płaszczyznami równoległymi do płaszczyzny  $XY$ . Następnie w każdym segmencie wykonywana jest ponowna segmentacja mająca na celu wyróżnić skupiska punktów. Ten etap oparty jest na kryterium odległościowym pomiędzy punktami.

Parametrami wejściowymi algorytmu są:

- 1)  $\Delta w$  - interwał segmentacji na warstwy – grubość segmentu w podziale wertykalnym chmury punktów,
- 2)  $d_{max}$  – maksymalna odległość pomiędzy punktami.

Wyjściem algorytmu jest model  $P$  w przestrzeni  $\mathbb{R}^3$  obiektu fizycznego będący unią zbioru modeli  $\{P_i\}$ . Warto zauważyć, że modele  $P_i$  spełniają warunek:

$$\cup P_i = P \text{ oraz } \forall_{i \neq j} P_i \cap P_j = \emptyset \quad (1)$$

### 2.2. Algorytm

Kroki algorytmu:

- 1) Podział chmury punktów na  $n$  zbiorów  $\{p_i\}^j, j \in J = \{1, 2, \dots, n\}$ , które spełniają warunek:

$$j \cdot \Delta w \geq z_j \geq (j + 1) \cdot \Delta w \quad (2)$$

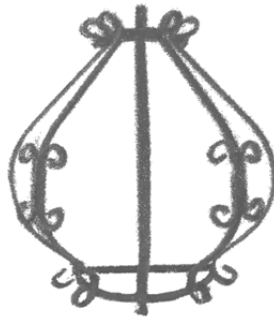
- 2) Segmentacja zbiorów  $\{p_i\}^j$  na podzbiory  $\{p_i\}^{j,k}$ ,  $k \in K = \{1, 2, \dots, m\}$ , przy założeniu, że odległość euklidesowa  $d$  każdego z punktów w podzbiorze od jego środka geometrycznego  $r_{j,k}$  nie może przekraczać  $d_{max}$ .
- 3) Projekcja zbiorów  $\{p_i\}^{j,k}$  na płaszczyznę  $z = j \cdot \Delta w$  w celu obliczenia otoczki wypukłej 2D:  $CH_{\{p_i\}^{j,k}}^{2D}$ .
- 4) Łączenie zbiorów werteksów otoczek w sąsiednich warstwach na podstawie kryterium minimalnoodległościowego:
 
$$\forall_{r,i,j} \exists d(r^{j,k}, r^{j+1,l}) = \min[d(r^{j,k}, r^{j+1,p})] \quad (3)$$
 gdzie:  $k \neq l \neq p$  oraz  $k, l, p \in K$   
 Rezultatem jest kolekcja zbiorów  $\{p_i\}^t$
- 5) Obliczenie otoczek wypukłych 3D ( $CH_{\{p_i\}^t}^{3D}$ ) dla każdego ze zbiorów  $\{p_i\}^t$ .  
 Rezultatem jest zbiór modeli  $\{P_i\}$ .
- 6) Obliczenie dla każdego z modeli  $\{P_i\}$  objętości  $V_i$ . Objętość modelu całego obiektu fizycznego obliczana jest wg wzoru:
 
$$V_P = \sum_i V_i \quad (4)$$
- 7) Obliczenie pola powierzchni  $A_i$  dla każdego z modeli  $\{P_i\}$ . Całkowite pole powierzchni modelu P obliczane jest wg wzoru:
 
$$A_P = \sum_i A_i - \sum_i A_{CH_{\{p_i\}^{j,k}}^{2D}} \quad (5)$$
- 8) Unia zbioru modeli  $\{P_i\}$ .

Implementację metody przeprowadzono w środowisku Microsoft .NET w języku Visual Basic. Wizualizację oparto o format dxf.

### 3. BADANIA

#### 3.1. Pomiary terenowe i laboratoryjne

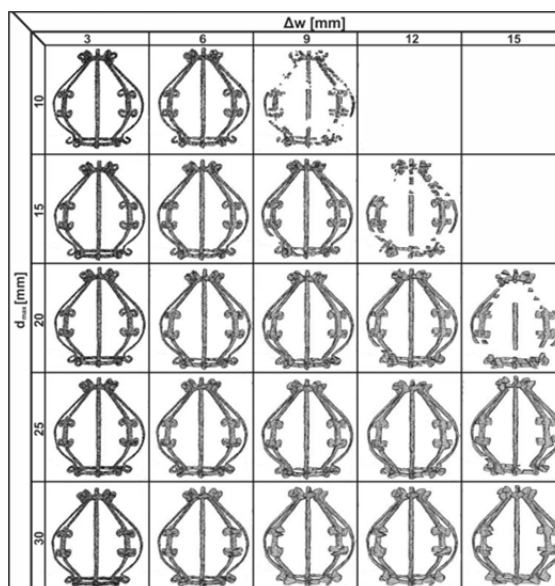
Badania w terenie obejmowały wykonanie skaningu laserowego zabytkowej kutej kraty stanowiącej osłonę Pięknej Studni w Nysie. Do pomiaru wykorzystano skaner Leica ScanStation2. Pomiar przeprowadzono z rozdzielczością ok. 5pkt./cm<sup>2</sup>. Ocenę jakości modelowania i wyznaczania objętości oraz dobór parametrów metody przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych na podstawie pomiaru obiektu referencyjnego stanowiącego wzorzec. Był nim fragment kraty wykonanej z płaskownika metalowego. Charakteryzował się on relatywnie stałymi wymiarami przez co ułatwiony był pomiar manualny za pomocą suwmiarki. Pomiar skanowaniem laserowym obiektu referencyjnego wykonano w laboratorium przy założeniu tych samych parametrów skanowania co w przypadku Pięknej Studni. Pomiar suwmiarką wykonano w odstępach co ok. 5 cm, w wyniku czego uzyskano pole powierzchni i objętość płaskowników użytych do wykonania obiektu. Miary te wynosiły odpowiednio: 188cm<sup>2</sup> i 267 cm<sup>3</sup>. Wykorzystano je jako wartości referencyjne dla obliczeń opartych o pomiar skanerem laserowym. Chmurę punktów obiektu referencyjnego przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Chmura punktów reprezentujących obiekt referencyjny pozyskana za pomocą naziemnego skaningu laserowego

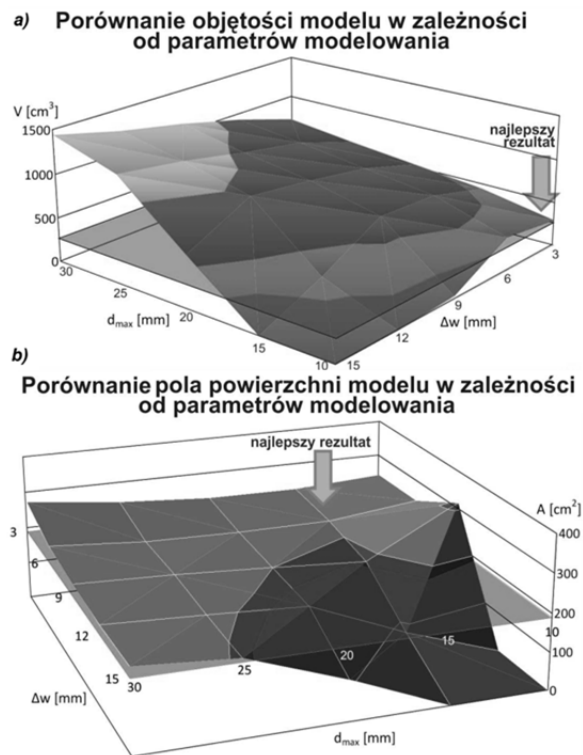
### 3.2. Badanie wpływu doboru parametrów metody na wyniki estymacji miar geometrycznych

Ponieważ algorytm posiada jedynie dwa parametry wejściowe:  $d_{max}$  i  $\Delta w$  przeprowadzono badania dotyczące doboru tych parametrów i ich wpływu na estymację miar geometrycznych – pola powierzchni modelu i objętości. Przyjęto następujące zakresy parametrów:  $d_{max}$  – 10;15;20;25;30 mm,  $\Delta w$  – 3;6;9;12;15 mm. Badania wykonano dla wszystkich kombinacji parametrów z przyjętego zakresu. W celu oceny jakościowej wykonano wizualizację modeli obiektu referencyjnego (rys 3).



Rys. 3. Wizualizacja wyników modelowania obiektu referencyjnego dla różnych wartości parametrów wejściowych algorytmu

Ilościową ocenę oparto o porównanie do miar obliczonych na podstawie pomiarów referencyjnych. Wyniki porównania przedstawiono na wykresach na rysunku 4. Za pomocą płaszczyzny przedstawiono na nich miarę referencyjną. Jak widać na rysunku 3 dla trzech kombinacji parametrów (10, 12; 10, 15; 15, 15) metoda nie zwróciła żadnej geometrii. Dla kombinacji 10, 9; 15, 9; 15, 12; 20, 12; 20, 15 i 25, 15 uzyskane modele nie posiadały ciągłości. Dla pozostałych kombinacji uzyskano modele ciągłe, jednak ich jakość różniła się znacząco między sobą. Problemy z ciągłością geometrii spowodowane są tym, że dla małych wielkości parametrów wejściowych, przy założonej rozdzielczości skanowania, nie zawsze spełniony jest warunek minimum 4 punktów w zbiorze na podstawie którego tworzona jest otoczka wypukła 3D. Na podstawie oceny jakościowej i ilościowej wybrano najlepszą kombinację parametrów zarówno dla obliczenia objętości jak i pola powierzchni. Wynosiły one odpowiednio: 10, 3 oraz 15, 6. Zaznaczono je za pomocą strzałek na rysunku 4.



Rys. 4. Wpływ doboru parametrów na estymowane miary: a) objętość, b) pole powierzchni

Analiza wykresów pozwala stwierdzić, że dobór parametrów ma istotne znaczenie dla jakości estymacji miar geometrycznych. Różnice w obliczonej objętości sięgały nawet kilkuset procent. Nieco większą stabilnością charakteryzują się wyniki estymacji pola powierzchni co jest zrozumiałe ze względu na zależność kwadratową, a nie sześcienną pomiędzy miarami.

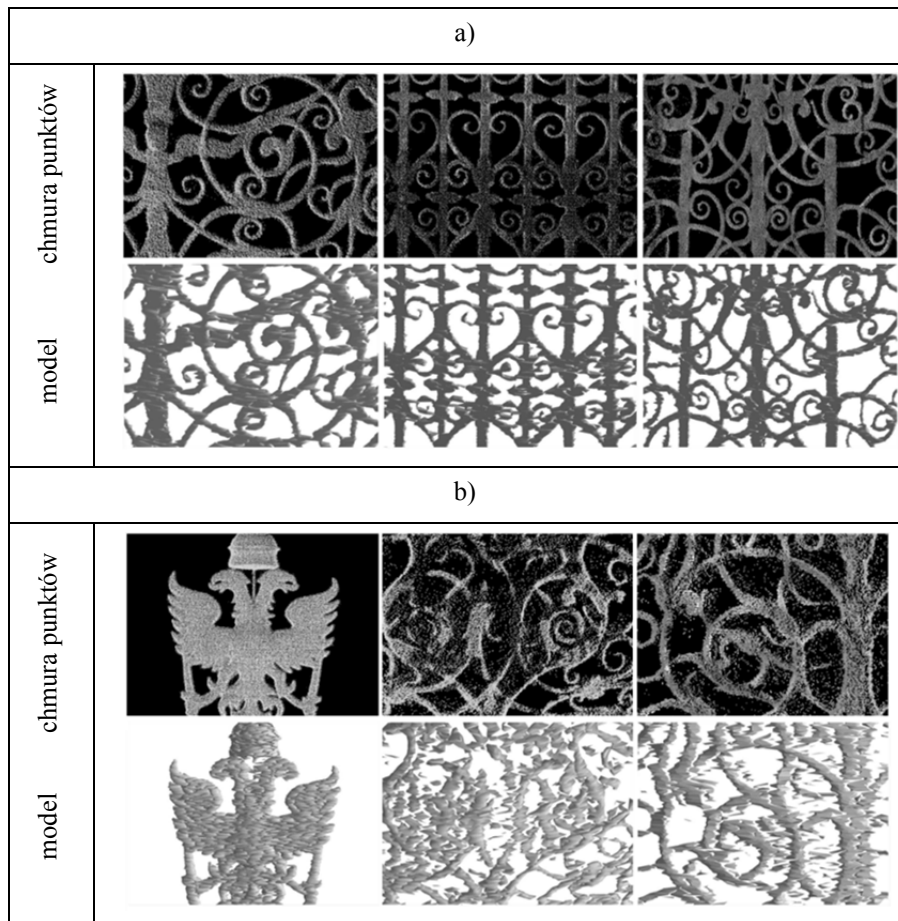
Do wykonania modelu Pięknej Studni w Nysie (rys. 5) wybrano parametry: 10, 3. Szczegóły uzyskanego modelu przedstawiają wizualizacje na rysunku 6. Jak widać, w zależności od wielkości szumu w danych pomiarowych, uzyskano dobre lub nienajlepsze rezultaty modelowania. Widać także, że w przypadku modelowania większych brył, uzyskany model nie jest jednolity. W drodze obliczeń uzyskano następujące wielkości miar: objętość  $81 \text{ dm}^3$ , pole powierzchni  $35,8 \text{ m}^2$ .



Rys. 5. Model Pięknej Studni w Nysie

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W praktyce inżynierskiej istnieje często konieczność wyznaczenia charakterystyk objętości obiektów, które mogą być trudno dostępne i posiadać skomplikowaną strukturę. Przykładem takich obiektów są elementy architektoniczne wykonane ze stali. Przedstawiona w pracy propozycja metody automatycznego modelowania obiektów na podstawie pomiarów skanerem laserowym może znaleźć zastosowanie w tym zadaniu. Charakteryzuje się ona dużą szybkością obliczeń – w wersji jednowątkowej modelowanie obiektu jakim jest Piękna Studnia w Nysie trwa kilkanaście do kilkudziesięciu minut w zależności od mocy obliczeniowych. Warunkiem uzyskania zadowalających rezultatów modelowania jest prawidłowy dobór parametrów metody oraz odpowiednia charakterystyka modelowanego obiektu – wykonanie z elementów o zbliżonych rozmiarach jak np. pręty lub płaskowniki. Dużą wadą jest wrażliwość metody na szum i błędy pomiarowe. Niedokładności pomiarowe oraz tzw. *ghost points* powodują zwiększenie wymiarów modelu w stosunku do rzeczywistego obiektu, a przez to przeszacowanie estymowanych miar geometrycznych. Dlatego dalsze prace skupiać się będą na udoskonaleniu algorytmu w tym zakresie, szczegółowej analizie dokładności algorytmu oraz implementacji wielowątkowej.



Rys. 6. Wizualizacja fragmentów modelu Pięknej Studni w Nysie – a) obszary poprawnie wymodelowane, b) błędy modelowania

## 5. LITERATURA

Awrangjeb M., Ravanbakhsh, M., Fraser, C. S., 2010. Automatic detection of residential buildings using LIDAR data and multispectral imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65 (2010), s. 457–467.

Dorniger P., Pfeifer N., 2008. A comprehensive automated 3D approach for building extraction, re construction and regularization from air borne laser scanning point cloud. *Sensors*, vol. 8, 7323–7343.

Tymków P., Borkowski A., 2010. Vegetation modelling based on TLS data for roughness coefficient estimation in river Valley. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Vol. XXXVIII No. 8, Kyoto, Japan 2010, 309-313.



Keil, J.M., 2000, Polygondecomposition. *Handbook of Computational Geometry*, Elsevier Science Publishers B.V. North-Holland, Amsterdam, s. 491-518.

Lien J.-M. and Amato. N.M., 2007, Approximate Convex Decomposition of Polyhedra, Proceedings of the ACM Symposium on Solid and Physical Modeling (SPM), Beijing, China, s. 121-131.

Igarashi Y., Suzuki H., 2011. Cover Geometry Design using Multiple Convex Hulls. *Computer-Aided Design*, Vol. 43, Issue 9, s. 1154-1162.

## **VOLUME ESTIMATION OF OBJECTS WITH COMPLEX GEOMETRY BASED ON TERRESTRIAL LASER SCANNING**

KEY WORDS: terrestrial laser scanning, 3D modelling, modelling algorithms, convex-hull, computational geometry, close range, TLS, GIS 3D

### **Summary**

The paper presents an automatic, coarse method for 3D modelling of metal objects with complex geometry for a need of volume estimation. The field research were conducted on a historic wrought iron bar that covers the historic well in Nysa (city In southern Poland). The presented modelling methodology is based on a layered convex-hull method, which involves dividing of a point cloud on the segments. Within each segment, segmentation is performed based on the minimum distance between points. The resulting sets of points are then modelled as a convex solids. Thanks to the segmentation of point clouds in each segment and the integration of convex shells a detailed object model can be obtained. That allows to estimate the geometric parameters such as volume and surface area of the object. The advantage of the proposed method is that it has a small number of parameters: a thickness of segment and the parameter of maximum distance between points in the process of segmentation of clouds within the segment. Applying the convex hull algorithm causes a selective filtering point clouds, thus resulting 3D model is based on a much smaller number of vertexes than the initial number of points in the cloud. The disadvantage of the proposed algorithm is an irregular triangle mesh models, resulting in low surface regularity and larger items, and sensitivity to measurement errors (noise, ghost points).

Dane autora:

Dr inż. Przemysław Tymków  
e-mail: przemyslaw.tymkow@igig.up.wroc.pl  
telefon: 71 320 19 53

Praca finansowana w ramach projektu NCN nr UMO-2011/01/D/ST10/07671.