

GENEROWANIE TRÓJWYMIAROWEGO MODELU BUDYNKU NA PODSTAWIE DANYCH LIDAROWYCH*

3D MODELING OF BUILDINGS BASED ON LIDAR DATA

Natalia Borowiec

Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska,
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza

SŁOWA KLUCZOWE: LIDAR, chmura punktów, rekonstrukcja, model budynku, 3D

STRESZCZENIE: Artykuł przedstawia pół-automatyczną metodę rekonstrukcji budynku 3D w oparciu o dane pochodzące z lotniczego skaningu laserowego. Głównym celem jest określenie kształtu dachu budynku, a następnie zrekonstruowanie budynku z zachowaniem topologii. Metoda, jaką zaproponowano do wykrycia płaszczyzn dachu działa na zasadzie dziel – łącz (ang. *split – merge*). Chmura punktów dzielona jest na jednakowe woksele (ang. *voxels* – wyraz utworzony z dwóch angielskich słów: *volumetric element*), tak aby odpowiadały one standardom CityGML, na poziomie szczegółowości LoD2. W wokselałach aproksymowane są płaszczyzny, które w oparciu o wyliczone parametry są łączone. Zatem szukanie połączeń dachowych budynku odbywa się na zasadzie przejścia od szczegółu do ogółu. Na podstawie wykrytych płaszczyzn wyznaczane są naroża oraz punkty charakterystyczne dachu. Ostatnim etapem jest eksport modelu budynku do uniwersalnego formatu wektorowego.

1. WPROWADZENIE

Automatyczna rekonstrukcja trójwymiarowych modeli budynków jest od kilku lat jednym z ważniejszych tematów badawczych na świecie. Wykorzystanie modeli budynków znajduje coraz większe zastosowanie, ponieważ obiekty 3D zdobywają coraz liczniejsze grono użytkowników, zarówno wśród amatorów jak i specjalistów. Wizualizacja pozyskanych danych staje się dość popularnym i nieodłącznym elementem wielu opracowań. Wynika to głównie z szybkiego rozwoju automatycznych sposobów pozyskiwania i przetwarzania danych źródłowych oraz wzrostu wydajności komputerów, obecnie nawet popularny komputer umożliwia bezproblemowe wyświetlanie trójwymiarowych obiektów.

We współczesnych rozwiązaniach fotogrametrycznych pierwszym źródłem danych były obrazy wykonane kamerami cyfrowymi, na podstawie których możliwa była rekonstrukcja modelu przestrzennego budynku. Wcześniej również konstruowano obiekty przestrzenne, ale w oparciu o analogowy zapis fotograficzny. Obecnie istotną rolę odgrywa lotniczy i naziemny skaning laserowy, które dostarczają dokładną informację na temat budynków w postaci chmury punktów. Modelowanie często odbywa się na podstawie integracji danych pochodzących z różnych źródeł, w celu osiągnięcia jak najlepszego efektu.

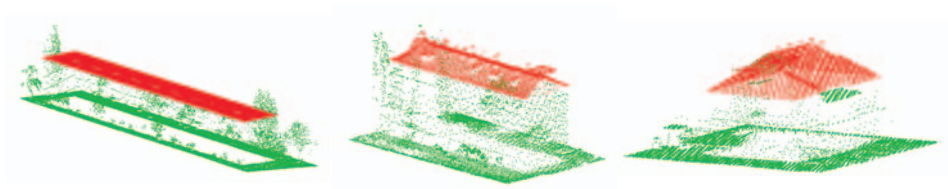
Początkowo zbudowane modele 3D budynków można było wykorzystać tylko do wizualizacji. Powstałe modele geometryczne nie uwzględniały relacji topologicznych między elementami. W 2002 roku podjęto próbę standaryzacji danych zapisano w CityGML. W pracach zakończonych w 2008 określono obowiązujące standardy budowania miast 3D (Meng, Forberg, 2006). CityGML definiuje klasy i powiązania dla najczęściej w miastach spotykanych obiektów topograficznych. Uwzględnia przy tym ich właściwości geometryczne, topologiczne (wzajemne relacje przestrzenne), semantyczne i wygląd. Wprowadza hierarchie pomiędzy klasami opisującymi poszczególne typy obiektów oraz modelowanie związane z pojęciem poziomu szczegółowości (ang. *LoD – Level of Detail*). Obecnie istnieje 5 poziomów szczegółowości. Najmniej dokładny jest poziom LoD0, który odwzorowuje duże obszary, natomiast największą dokładnością wykazuje się poziom szczegółowości LoD4, gdzie oprócz szczegółów zewnętrznych wykryte są elementy wewnętrzne budynku. Najbardziej optymalnym poziomem szczegółowości budynków dla potrzeb przeprowadzania analiz przestrzennych jest poziom LoD2, który ma dokładność sytuacyjną równą 2 m, a dokładność wysokościową 1 m. Taka dokładność jest również wymagana do produkcji tzw. „prawdziwej” ortofotomapy (ang. *true orthophotomap*) dla terenów miejskich.

2. CHARAKTERYSTYKA DANYCH WYKORZYSTANYCH W BADANIACH

W badaniach wykorzystano dane, które zostały udostępnione przez Biuro Planowania Przestrzennego Urzędu Miasta Krakowa. Pomiar lidarowy obejmował obszar miasta Krakowa oraz jego okolice w sumie około 400 km².

Grupa testowa składa się z 3 charakterystycznych budynków, gdzie przy wyborze kierowano się stopniem skomplikowania dachu. Wszystkie analizowane budynki znajdują się na terenie Krakowa. Pierwszy budynek jest to typowy blok o dachu płaskim, drugi budynek ma dach dwuspadowy, natomiast ostatni obiekt poddany analizie ma dach o kształcie czterospadowym. Sklasyfikowana chmura punktów reprezentująca kolejno wymienione budynki została przedstawiona na rysunku poniżej (Rys. 1).

W niniejszym artykule badany jest kształt dachu, zatem z chmury punktów wybrano tylko te punkty, które reprezentują dach. Zabieg ten można wykonać manualnie wspomagając się komercyjnymi oprogramowaniami (Terrasolid, 2009; DTMaster, 2008), lub na podstawie automatycznie wykrytych krawędzi dachu budynku, które określają granicę między punktami terenowymi a punktami odbitymi od dachu (Borowiec, 2008). Obrys budynku można również pozyskać z ewidencji (Peternell, Steiner, 2003; Brenner, Gös-



Rys. 1. Reprezentacja budynków w formie chmury punktów (od lewej: budynek z płaskim, dwuspadowym i czterospadowym dachem).

seln, 2004; Teo, 2008), bądź na podstawie krawędzi ze zdjęć lotniczych (Sohn, Dowman, 2003; Hu, *et al.*, 2004).

3. OKREŚLENIE KSZTAŁTU DACHU

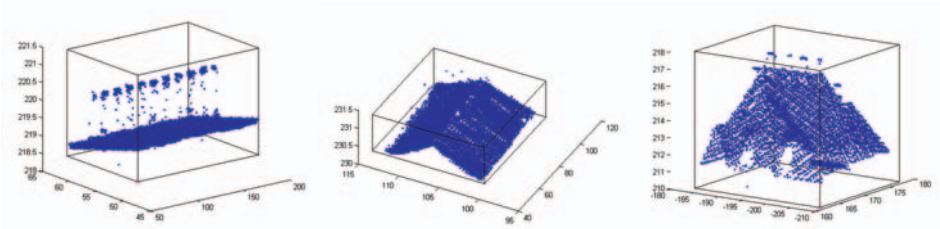
Rekonstrukcja modelu budynku wiąże się z opisem matematycznym kształtu dachu oraz ścian zewnętrznych budynku. Oprócz informacji dotyczących krawędzi dachu, konieczne jest znalezienie i zdefiniowanie połączeń dachowych, które określają kształt dachu obiektu budowlanego. Kształt dachu wyznaczany jest w oparciu o trójwymiarową siatkę regularną zbudowaną z prostopadłościów (wokseli).

3.1. Podział chmury punktów na woksele

Wykrycie płaszczyzn dachu z punktów lidarowych jest jednym z etapów prowadzących do zbudowania modelu budynku. W tym celu wykorzystywane są punkty reprezentujące dach, które zostały manualnie, (bądź automatycznie) wyłonione z całej chmury punktów.

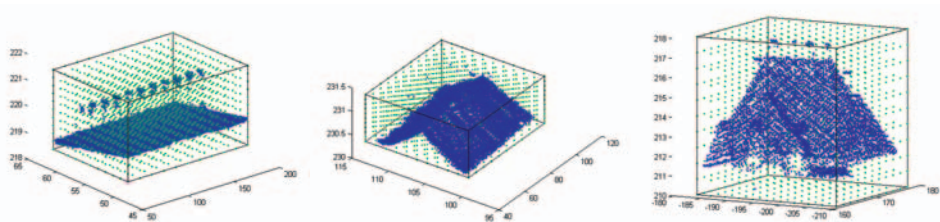
Kształt dachu określany jest na podstawie wyłonionych połączeń dachowych. Metoda jaką zastosowano do wykrycia płaszczyzn opiera się na zasadzie dziel – łącz (ang. *split – merge*). Etapy dzielenia i łączenia wykonywane są w przestrzeni.

W celu uproszczenia obliczeń, wydzielona chmura punktów transponowana jest do układu lokalnego, który jest równoległy do układu kartezyjskiego, czyli prostoliniowego układu współrzędnych, o prostopadłych osiach liczbowych. Wykonanie takiego zabiegu ułatwia i usprawnia znalezienie punktu początkowego, który położony jest najbliżej środka układu współrzędnych, jak również współrzędnych punktów najbardziej wysuniętych w trzech kierunkach układu. Pomiedzy najbardziej wysuniętymi punktami obliczana jest odległość wzdłuż wszystkich osi: X, Y i Z. Odległości umożliwiły zdefiniowanie prostopadłościanu, który obejmuje cały zbiór punktów reprezentujących dach (Rys. 2). Długość podstawy prostopadłościanu odpowiada długości obliczonej po X, szerokość podstawy odpowiada długości po Y, a wysokość prostopadłościanu długości po Z. Prostopadłościan zaczepiony jest w wyznaczonym punkcie początkowym i jest opisany na chmurze punktów.



Rys. 2. Prostopadłościan zawierający chmurę punktów, która reprezentuje dach.

Kolejnym krokiem badań jest podział prostopadłościanu, opisanego na chmurze punktów, na mniejsze, o jednakowych wymiarach woksle (inaczej komórki, prostopadłościany). Dobór wielkości mniejszych prostopadłościanów uzależniony jest od wymiarów ścian prostopadłościanu początkowego. Analiza długości, szerokości i wysokości krawędzi prostopadłościanu początkowego umożliwia proporcjonalny podział bryły. Proporcje zachowane są we wszystkich trzech kierunkach. Jednak rozmiar woksli musi odpowiadać normom CityGML na poziomie LoD2, czyli dokładność sytuacyjna musi być większa od 2 m, a dokładność wysokościowa większa od 1 m. W efekcie otrzymano początkowy prostopadłościan opisany na chmurze punktów oraz zbiór komórek o jednakowych wymiarach (Rys. 3).



Rys. 3. Prostopadłościan opisany na punktach należących do dachu budynku (niebieskie punkty), wraz z oznaczonymi wierzchołkami komórek (zielone punkty).

3.2. Etapowe wyznaczenie połączeń dachowych

W pierwszej fazie wykrywania płaszczyzn, każdy mały prostopadłościan analizowany jest osobno. Indywidualnie, w każdym prostopadłościanie zliczana jest liczba punktów; jeżeli liczba punktów jest mniejsza niż trzy, to komórka jest pomijana (brak obserwacji nadliczbowych). W przypadku, gdy liczba punktów w prostopadłościanie jest większa niż trzy, aproksymowana jest płaszczyzna, na podstawie tych punktów. Do wyznaczenia parametrów płaszczyzny zastosowano metodę najmniejszych kwadratów.

Metoda ta minimalizuje sumę kwadratu odległości poszczególnych punktów do wpasowywanej płaszczyzny (3). W przestrzeni euklidesowej 3D najlepiej płaszczyznę opisuje następujący wzór:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (1)$$

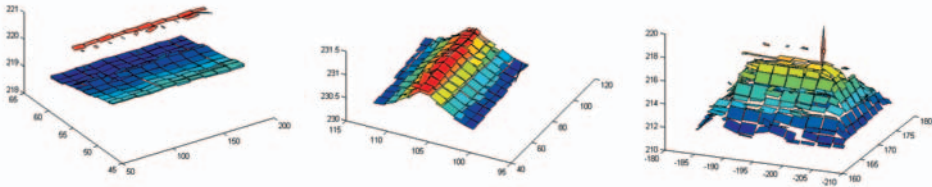
gdzie:

A,B,C,D – parametry płaszczyzny.

Odległość punktów do płaszczyzny liczona jest z powszechnie znanego wzoru:

$$d_i = F(A, B, C, D) = \frac{Ax_i + By_i + Cz_i + D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N \delta_i^2 \Rightarrow \min \quad (3)$$



Rys. 4. Płaszczyzny wpasowane w punkty znajdujące się w poszczególnych prostopadłościach – widok izometryczny.

Na podstawie obliczonych parametrów płaszczyzn można określić własności każdej elementarnej płaszczyzny, tj. spadek (4), azymut (5) oraz średnią wysokość punktów (6).

Wartość maksymalnego spadku oraz azymut płaszczyzn obliczono na podstawie wektora normalnego ($N = [A \ B \ C]$) wyznaczonego z ogólnego równania płaszczyzny (1). Kolejne parametry opisujące płaszczyzny uzyskano z następujących wzorów:

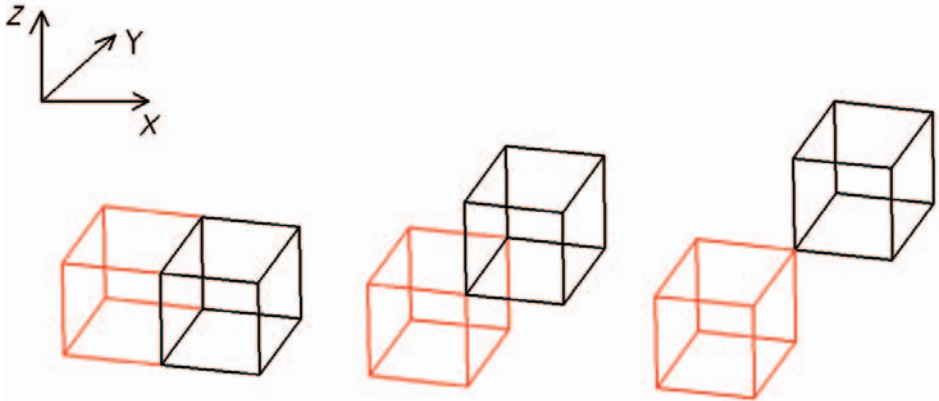
$$tg(s) = \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (4)$$

$$tg(Az) = \frac{B}{A} \quad (5)$$

$$w_{\text{sr}} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{n} \quad (6)$$

Wyłonienie połączeń dachowych możliwe jest dzięki przeprowadzeniu segmentacji prostopadłościów, która polega na scaleniu komórek w większe skupiska. Proces łączenia polega na szukaniu podobieństw wśród wyaprosymowanych płaszczyzn.

W procesie tym najpierw wybierane są prostopadłościany centralne. Prostopadłościany centralne to takie, które mogą mieć 26 sąsiadów, gdzie każdy sąsiad z komórką centralną może mieć wspólną ścianę, krawędź lub wierzchołek (Rys. 5).

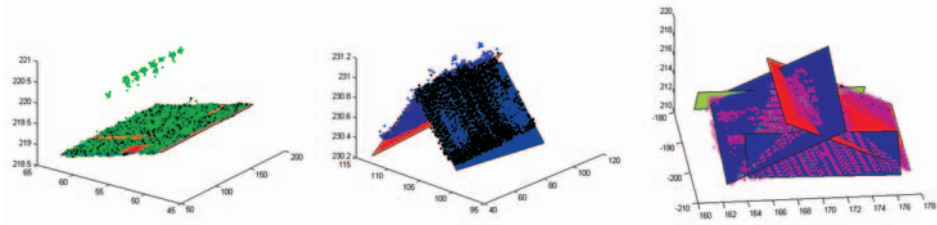


Rys. 5. Woksel centralny (czerwony) wraz z sąsiadem (czarny). Od lewej: wspólna ściana, wspólna krawędź i wspólny wierzchołek.

Centralny woksel stanowi ognisko skupiska, które rozrasta się przez dołączanie sąsiednich komórek. Przy odpowiedniej numeracji wokseli możliwe jest automatyczne znalezienie komórek sąsiednich. Łączenie komórek sąsiednich z centralną polega na sprawdzaniu parametrów wyaprosymowanych płaszczyzn. Sprawdzanymi parametrami są następujące wielkości: wektor normalny płaszczyzny, azymut, nachylenie oraz średnia wysokość płaszczyzny. Kryterium łączenia opiera się na sprawdzeniu składowych wektora normalnego, a następnie na zdefiniowaniu wartości granicznych dla spadku, azymutu i średniej wysokości. Łączenie punktów następuje wówczas, gdy spełnione są określone kryteria graniczne. Dla wszystkich przypadków przyjęto następujące granice, w których musiały się zawierać wartości analizowanych parametrów:

- azymut: $\pm 10^\circ$,
- nachylenie: $\pm 5^\circ$,
- średnia wysokość: ± 1 m.

Jeżeli wszystkie wartości parametrów sąsiednich prostopadłościanów spełniają określone warunki, wówczas punkty zawarte w tych komórkach są łączone w jeden zbiór. Z otrzymanych nowych zbiorów aproksymowana jest ponownie płaszczyzna metodą najmniejszych kwadratów. Proces łączenia punktów zawartych w poszczególnych prostopadłościanach, przebiega iteracyjnie, aż do momentu wyłonienia płaszczyzn głównych, co przedstawiono na rysunku poniżej (Rys. 6).



Rys. 6. Rzut izometryczny wykrytych płaszczyzn głównych budynków wraz z nałożoną chmurą punktów.

3.3. Określenie współrzędnych punktów charakterystycznych dachu

Współrzędne punktów charakterystycznych obiektu umożliwią określenie wielościennego modelu budynku. Matematyczny opis modelu budynku wymaga wyznaczenia współrzędnych naroży oraz punktów załamania płaszczyzn. Za współrzędne naroży uznano punkty najdalej wysunięte w zbiorach, z których aproksymowana jest połączona dachowa, natomiast załamania płaszczyzn otrzymano w wyniku ich przecięcia. Proste, jakie otrzymano w miejscu przecięcia się dwóch płaszczyzn to:

- kalenica, czyli górna krawędź połączenia dachowej,
- naroże, czyli krawędź wypukła na przecięciu dwóch połączeń, też zwana kalenicą narożną.

Współrzędne naroży budynku mogą być wyznaczone na etapie ekstrakcji krawędzi (Borowiec, 2008) lub pozyskane z danych ewidencyjnych (Brenner, 2004; Teo, 2008).

4. REKONSTRUKCJA BUDYNKU

Rekonstrukcja modelu budynku wiąże się z opisem matematycznym kształtu dachu oraz ścian zewnętrznych budynku.

4.1. Import NMT

W specjalistycznym oprogramowaniu TerraScan (Terrasolid Ltd.) z chmury punktów został zbudowany numeryczny model terenu. Oprogramowanie bazuje na algorytmie aktywnego modelu TIN, który został opracowany na Wydziale Geodezji i Fotogrametrii w Królewskim Instytucie w Sztokholmie (Terrasolid, 2009). Idea filtracji opiera się na powierzchni przebiegającej poniżej wszystkich punktów pomiarowych. Powierzchnia ta jest połączona z punktami terenowymi za pomocą tzw. punktów łączących, spełniających określone kryterium.

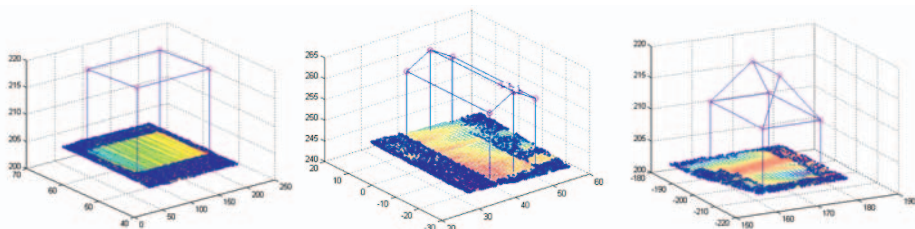
Dzięki zastosowaniu algorytmu aktywnego modelu TIN otrzymany numeryczny model terenu jest reprezentowany przez zbiór punktów rozproszonych. Zbiór ten zapi-

sywany jest do pliku tekstowego i importowany do środowiska MATLAB (The Math-Works). W środowisku tym łączone są ze sobą dwie warstwy punktów, co umożliwia sprawdzenie czy teren prawidłowo otacza budynek. Warstwami tymi są: punkty reprezentujące dach budynku oraz punkty budujące NMT. Jeżeli weryfikacja usytuowania budynku jest poprawna, wówczas można określić współrzędne obrysu budynku. Obrys budynku powstaje dzięki zrzutowaniu naroży dachu budynku na powierzchnię terenu i wyznaczeniu współrzędnych przecięcia się krawędzi ścian bocznych z płaszczyzną.

W tym celu przeprowadzono tzw. „przepróbkowanie” (ang. *gridding*). Próbkowanie terenu polega na określeniu wysokości terenu w konkretnym punkcie, czyli jest to uzupełnienie powierzchni terenu o nowe wysokości. Zatem na powierzchni opisanej funkcją $z = f(x,y)$ generowane są wysokości punktów w miejscach o znanych współrzędnych płaskich. Wyznaczenie wysokości naroży obrysu możliwe jest dzięki interpolacji metodą najbliższego sąsiada, która przelicza współrzędne terenowe na podstawie NMT.

4.2. Budowa wielościennego modelu budynku i jego eksport

Znajomość równań płaszczyzn dachu budynku, równań prostych – krawędzi dachu i ścian bocznych oraz współrzędnych wszystkich wierzchołków bryły umożliwia zbudowanie topologii budynku (Rys. 7).



Rys. 7. Modele budynków umiejscowione na powierzchni terenu.

Aby dane przestrzenne (model budynku) mogły zostać wykorzystane dla potrzeb systemów informacji przestrzennej, muszą być przechowywane w pliku o uniwersalnym formacie. Jedną z form dogodnych dla różnych programów aplikacyjnych jest zapis wektorów w formacie DXF (ang. *Data Exchange Format*). Format ten jest jednym z bardziej popularnych formatów wektorowych, w którym można zapisywać zarówno rysunki 2D jak i zawierające elementy 3D. Specyfikacja tego formatu została opracowana przez firmę Autodesk i początkowo służyła do wymiany danych pomiędzy programami AutoCAD i 3D Studio. Z czasem format ten rozpowszechnił się i zaczął być wykorzystywany przez inne firmy. Jego popularność związana jest z prostotą tworzenia plików w tym formacie i udostępnieniem jego pełnej dokumentacji. DXF jest plikiem tekstowym w formacie ASCII, dzięki czemu jego poprawny odczyt

i zapis jest możliwy na każdej platformie sprzętowej i systemowej. Wadą takiego rozwiązania jest jednak stosunkowo duża wielkość pliku w porównaniu z jego binarnym odpowiednikiem DWG, jak również znacznie większy czas odczytu i zapisu pliku.

5. PODSUMOWANIE

W niniejszym artykule przedstawiono autorskie rozwiązanie określania kształtu dachu budynku, a następnie rekonstrukcja modelu i jego zapis w formie wektorowej.

Zaproponowana metoda jest w stanie zbudować model nieskomplikowanego budynku. Badania wykazały, że na podstawie takiej analizy możliwe jest wyłonienie dachów jedno, dwu i czterospadowych oraz płaszczyzn będących na różnej wysokości. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że kształt dachu budynku (nieskomplikowanego) został określony z dokładnością sytuacyjną równą 2 m, a wysokościową 1 m, co odpowiada standardom CityGML na poziomie szczegółowości LoD 2.

Cały proces generowania modelu odbywa się automatycznie, dzięki napisanej aplikacji w środowisku MATLAB (The MathWorks).

Obecnie prowadzone są badania nad wykryciem płaszczyzn dachów złożonych. Z uwagi na fakt, że kształt dachu określany jest przez przejście od szczegółu do ogółu można przypuszczać, że wszystkie elementy o maksymalnym zasięgu 2 m, uda się wykryć i wymodelować.

Badania wykonano w ramach grantu promotorskiego nr N526 136534, finansowanego przez KBN.

6. LITERATURA

Borowiec N., 2008. Building extraction from ALS data based on regular and irregular tessellations. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVII, Part B6b.

Brenner C., von Gosseln G., 2004. Tools and workflow for the rapid acquisition of city models. *Proc. UDMS*, Chioggia, Włochy.

DTMaster. 2008: <http://www.inpho.de>

Hu J., You S., Neumann U., Kook Park K., 2004. Building modeling form LiDAR and aerial imagery. *ASPRS Annual Conference Proceedings*, Denver – Colorado.

Meng L., Forberg A., 2006. 3D Building Generalisation. [w:] *Challenges in the Portrayal Geographical Information: Issues of Generalisation and Multi Scale Representation*. Munchen, Niemcy.

Peternell, M., Steiner, T., 2003. Reconstruction of Piecewise Planar Objects from Point Clouds. *Computer-Aided Design*, Vol. 36, s. 333-342.

Sohn G., Dowman I., 2003. Building extraction using Lidar DEMs and Ikonos images. *ISPRS*, Commission 3.

Teo A., 2008. Parametric reconstruction for complex building from lidar and vector maps using a divide and conquer strategy. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, ISPRS Congress, Pekin.

Terrasolid. 2009: <http://www.terasolid.fi>

Wang Z., Schenk T., 2000. Building Extraction and Reconstruction from Lidar Data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 33, B3.

3D MODELING OF BUILDINGS BASED ON LIDAR DATA

KEY WORDS: LiDAR, cloud of points, reconstruction, building modeling, 3D.

SUMMARY: This paper presents a semi-automatic method, using only ALS data, to build a model of a building. This method focuses on modelling the roof, assuming that by knowing the shape of the roof and the digital presentation of a terrain, one can easily obtain a model of the whole building. The step consists of detecting plane surfaces from which we define the shape of the building's roof. The roof planes are detected using the split-merge method in which a LIDAR point cloud is organized and planes are extracted from each voxel. The planes are joined when parameters such as slope, azimuth and height are contained in the definition of boundary. The final step is exporting the building model to dxf format.

mgr inż. Natalia Borowiec
nboro@agh.edu.pl
telefon: +48 12 6173993

* wersja kolorowa artykułu jest dostępna na stronie <http://www.sgp.geodezja.org.pl/ptfit>