



Analiza możliwości wykorzystania danych z lotniczego skaningu laserowego do opracowywania trójwymiarowych modeli miast

ANNA FRYŚKOWSKA

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,
Zakład Teledetekcji i Fotogrametrii, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2
afryskowska@wat.edu.pl

Streszczenie. Obecnie ponad połowa populacji ludzi na świecie żyje na terenach zurbanizowanych. Problem wizualizacji obszarów zurbanizowanych za pomocą danych fotogrametrycznych pojawił się już na początku tego wieku. Trójwymiarowe modele miast są opracowywane dla większych miast już od kilku lat i obecnie znajdują szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i gospodarki. Między innymi: w planowaniu przestrzennym i urbanistycznym, nawigacji samochodowej oraz systemach informacji geograficznej.

Istnieje wiele metod wykonywania trójwymiarowych modeli miast. Najważniejsze z nich to opracowanie modeli ze zdjęć lotniczych i satelitarnych na drodze cyfrowej korelacji obrazów, a w ostatnich latach równie popularną metodą stało się generowanie Numerycznych Modeli Pokrycia Terenu (NMPT) z danych z lotniczego skaningu laserowego. Dane takie umożliwiają wykonanie NMPT, a następnie na drodze filtracji tych danych opracowuje się modele kolejno najpierw wykrywając budynek, ekstrahując jego krawędzie i rekonstruując geometrię. W artykule przedstawiona zostanie analiza możliwości wykorzystania lotniczego skaningu laserowego do opracowywania modeli 3D miast oraz metody filtracji chmury punktów. Poruszone zostaną kwestie związane z charakterem danych z Lotniczego Skaningu Laserowego (LSL) oraz przeanalizowane szczegółowe wytyczne dotyczące modelowania terenów zurbanizowanych — czyli standard CityGML opracowany przez Open Geospatial Consortium, uwzględniając generalizację tych modeli.

Słowa kluczowe: fotogrametria, modele 3D, LIDAR, filtracja, NMPT, wykrywanie budynków

1. Wprowadzenie

Pod pojęciem trójwymiarowego modelu miasta rozumiany jest opis obiektu zlokalizowanego na terenie zurbanizowanym (w mieście) zawierający informację

3D o jego geometrii i konstrukcji. Budowa takich modeli wymaga dużych nakładów finansowych zarówno w procesie pozyskiwania jak i przetwarzania danych, dlatego bardzo istotne jest wszechstronne wykorzystanie takich modeli oraz ich wysoka dokładność i duża szczegółowość.

Wśród najbardziej popularnych zastosowań modeli 3D miast wyróżniamy:

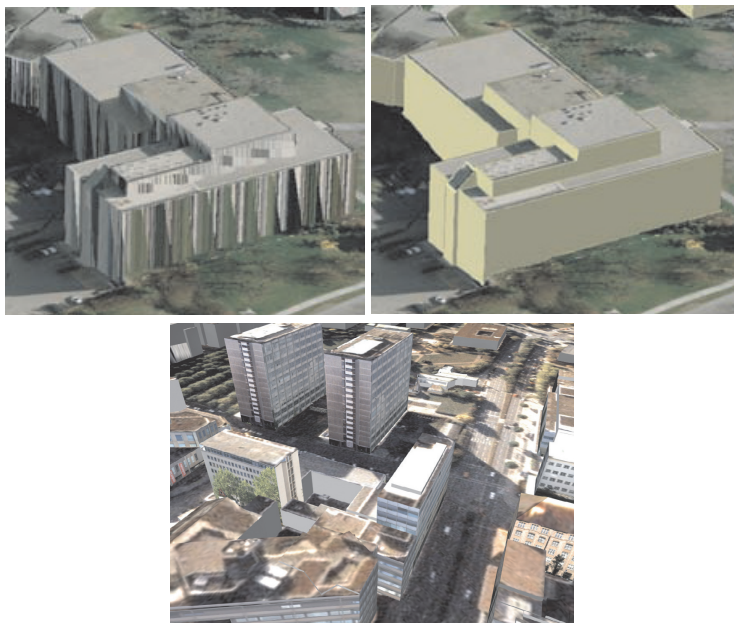
- Systemy Informacji Przestrzennej (analizy związane z Numerycznym Modelem Terenu i Numerycznym Modelem Pokrycia Terenu),
- planowanie urbanistyczne,
- analizy statystyczne i symulacje (propagacja fal, analiza hałasu, zagrożenia powodziowe i pożarowe, przepływ powietrza, poziom hałasu ulicznego, planowanie rozmieszczenia przekaźników GSM itp.),
- wojsko i obronność (szkolenia),
- architektura i nieruchomości (budynki zabytkowe, historyczne, reprezentacyjne, nowa zabudowa),
- systemy nawigacji samochodowej (turystyka, informacja o położeniu)
- multimedia.

Większość Numerycznych Modeli terenu oraz modeli 3D miast wykonywanych jest na podstawie zdjęć lotniczych bądź satelitarnych oraz coraz bardziej popularnego lotniczego skaningu laserowego określanego mianem LIDAR. Na drodze wektoryzacji, stereodigitalizacji lub korelacji obrazów wykonywane są Numeryczne Modele Pokrycia Terenu (NMPT), a z nich pozyskiwane są trójwymiarowe modele obiektów znajdujących się nad powierzchnią ziemi. Modele takie nie posiadają informacji np. o elewacji budynku czy też elementach znajdujących się na płaszczyznach bocznych obiektów, dlatego też często uzupełnia się je teksturą ze zdjęć lotniczych lub naziemnych.

Na rysunku 1 przedstawiono fragment modelu uzyskany ze zdjęć lotniczych oraz przykładowy fragment modelu po wypełnieniu teksturą.

Metoda cyfrowej korelacji obrazów fotogrametrycznych jest klasyczną metodą generowania NMPT. Jednak metoda ta jest efektywna zazwyczaj na terenach płaskich o niskiej zabudowie, zaś na obszarach silnie zurbanizowanych błędy związane z okluzjami i nieciągłościami powierzchni sprawiają, że tradycyjne metody są niewystarczające w przypadku modeli obiektów o skomplikowanej strukturze czy kształcie [1].

W ciągu ostatnich kilku lat rozwinęły się dwie techniki systemów aktywnych: RADAR i LIDAR. Obie technologie mają swoje wady i zalety. Systemy radarowe pozwalają na osiągnięcie dokładności modelu rzędu 1 m, zaś LIDAR — choć dokładniejszy — jest systemem droższym (pod względem kosztów pozyskania danych), ale zdecydowanie bardziej popularnym.



Rys. 1. Wizualizacja fragmentu miasta w postaci modelu bryłowego i poniżej modelu z teksturą [6]

2. Zastosowanie lotniczego skaningu laserowego do wykonywania trójwymiarowych modeli miast

Bardzo wygodnym narzędziem, które ostatnio stało się ważnym źródłem danych wykorzystywanych w systemach informacji przestrzennej, jest LSL.

Lotniczy skaningu laserowy popularnie nazywany LIDARem opiera swoją zasadę działania na wykorzystaniu impulsu lasera w celu śledzenia i wykrywania odległości do obiektów znajdujących się na powierzchni ziemi. Dane pozyskane z pomiarów cechują się różną dokładnością w zależności od rodzaju systemu, charakteru podłoża oraz czynników środowiskowych. LSL wciąż jest wiodącą technologią, którą wykorzystuje się do opracowywania modeli 3D miast i Numerycznych Modeli Pokrycia Terenu.

2.1. Ekstrahowanie konturów budynków

Większość metod opracowywania modeli budynków obejmuje następujące etapy: generowanie Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu, wykrywanie krawędzi budynków (filtracja), a także generalizację i stworzenie właściwych krawędzi dachów oraz ścian budynków.

Z uwagi na fakt, że budynki ekstrahowane są z NMPT, to krawędzie wyodrębnia się między innymi na podstawie kryterium geometrii. Algorytmy te są usprawniane na podstawie ogólnych wiadomości o charakterze budynków, np. wymiarze, generalnych kształtach i wysokościach.

2.2. Przygotowanie danych

Surowe dane z lotniczego skaningu laserowego to dane w postaci chmury punktów o znanych współrzędnych XYZ wraz z intensywnością powracającego sygnału. Następnie, w celu wygenerowania NMPT, dane powinny być przetworzone do postaci siatki grid. Istnieje wiele metod interpolacji powierzchni: wykorzystujące odwrotności odległości, *kriging*, czy funkcje wielomianowe. Często w celu wyodrębnienia budynku wykorzystuje się metodę interpolacji najbliższego sąsiada, aby uniknąć wygładzenia powierzchni i zachowania „ostrości” krawędzi.

Najczęściej do modelowania wykorzystuje się znormalizowany Numeryczny Model Terenu — powstały w wyniku odjęcia NMPT od NMT i zawierający informacje jedynie o pokryciu terenu.

Powierzchnia ziemi i osobno obiekty znajdujące się na niej mogą być otrzymane na drodze klasyfikacji punktów pod względem przynależności do rzeczywistej powierzchni ziemi — czyli filtracji danych z LSL.

2.3. Filtracja

Istnieje wiele metod filtracji danych. Ogólnie możemy je podzielić na algorytmy stosujące strukturę hierarchiczną lub algorytmy iteracyjne. Wspólną ich cechą jest akcent na punkty o najniższych wysokościach, jako prawdopodobne punkty terenowe. Bardzo często dane dostarczane są w postaci wstępnie uporządkowanej, czyli zapisane w siatce regularnej [3]. Jest to zarazem jedna z metod redukcji powtarzających się danych znana jako rasteryzacja oraz możliwość zastosowania uproszczonych algorytmów filtracyjnych. Ponadto zbiór danych może być wizualizowany jako obraz w skali szarości (wartość jasności pikseli odpowiada wysokości punktu w terenie), wówczas do filtracji można użyć analiz przetwarzania obrazu cyfrowego.

Filtry zawsze operują na lokalnym sąsiedztwie dwóch lub większej liczby punktów. Funkcje wykrywające mogą badać i klasyfikować nawet kilka zgrupowanych punktów jednocześnie. Warunkiem klasyfikacji może być np. wartość progowa kąta spadku lub różnica wysokości pomiędzy badanymi punktami. Ponadto istnieją filtry wyróżniające punkty z danych grup punktów i klas. Czas „działania” algorytmów eliminacji jest zależny od ilości danych oraz przyjętej metody obliczeniowej. Algorytmy iteracyjne są dokładniejsze, ale bardziej czasochłonne.

Istnieje kilkanaście algorytmów do automatycznej filtracji danych laserowych. Główne metody wykorzystywane w celu selekcji punktów można podzielić na:

- a) filtry wykorzystujące metody obrazu cyfrowego:
 - filtry morfologiczne (Vosselmann, Zhang),
 - metoda gradientu (Hyypä),
 - segmentacja (Roggero),
 - modelowanie aktywnych powierzchni (Elmqvist),
 - FFT (Marmol, Jachimski; AGH),
 - wykorzystujące intensywność odbicia (Song);
- b) metody wykorzystujące interpolację:
 - predykcja liniowa (Pfeifer),
 - interpolacja krzywymi sklejanymi (Brovelli),
 - metoda aktywnego modelu TIN (Axelesson).

2.3.1. Krótka charakterystyka porównawcza najczęściej stosowanych filtrów

Filtry morfologiczne wykorzystują metody cyfrowego przetwarzania obrazu. Opierają się one na wyborze minimalnej lub maksymalnej wartości wysokości punktu w zdefiniowanym sąsiedztwie oraz analizie struktury, kształtu obiektów na obrazie i ich wzajemnej lokalizacji.

Jedną z metod **filtracji interpolacyjnej** jest algorytm **aktywnego modelu TIN**, opracowany przez Axelssona i wykorzystywany w komercyjnym oprogramowaniu *Terrascan*. Idea tego filtru opiera się na ustaleniu powierzchni przebiegającej poniżej wszystkich punktów pomiarowych, połączonej z punktami terenowymi określonymi punktami łączącymi. Na punkty nakładana jest siatka i przeprowadzana triangulacja na punktach o najniższej wartości wysokości. Dalsze tworzenie modelu przebiega iteracyjnie, przyłączając kolejne punkty pomiarowe na drodze spełniania określonych kryteriów — wartości progowych. Algorytm działa najlepiej dla powierzchni ciągłych. W przypadku nieciągłości topograficznych występujących często na terenach zurbanizowanych następuje błędne usunięcie krawędzi, ponieważ przekraczają one ustaloną wartość progową.

Inną metodą jest **predykcja liniowa**, zaimplementowana w programie *SCOP++*. Oparta jest na iteracyjnym aproksymowaniu powierzchni z uwzględnieniem funkcji wagowej. Poszczególne punkty pomiarowe są wagowane w zależności od odchyłki danego punktu pomiarowego od powierzchni aproksymowanej w poprzedniej iteracji. Jako metodę aproksymacji powierzchni przyjęto predykcję liniową [3].

W przypadku terenów silnie zurbanizowanych, filtrację przeprowadza się w oparciu o algorytm **szybkiej interpolacji hierarchicznej**, początkowo celowo zmniejszając rozdzielczość danych, później sukcesywnie ją zwiększając.

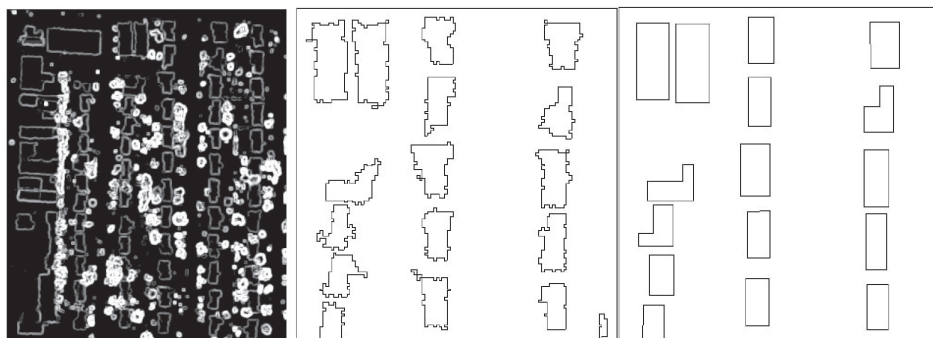
Ważną metodą bazującą na intensywności odbieranego echa jest **metoda intensywności**. Natężenie powracającego światła wynika bezpośrednio ze zdolności odbijania

wiązki od powierzchni obiektów i związanego z nią współczynnika odbicia. Parametr ten jest zmienny w zależności od materiału pokrywającego przedmioty terenowe. Niemniej jednak, dane o intensywności powracającego sygnału często zawierają szumy, błędy grube i mogą charakteryzować się słabą rozróżnialnością, jeśli długość emitowanej fali nie jest odpowiednio dobrana do badanej powierzchni. Wówczas głównym źródłem szumów jest kąt odbicia, ponieważ dla różnych jego wartości różne materiały posiadają inną charakterystykę odbiciowości (rozpraszania fali odbijającej się od ich powierzchni), co przejawia się zmienną (w zależności od rodzaju materiału i kierunku padania promienia laserowego) intensywnością powracającego sygnału. Ponadto błędne dane wynikają z niedokładności pomiaru pozycji, odległości lub orientacji. Zawodność tej metody pojawia się wówczas, gdy obiekty nie różnią się wysokością ani współczynnikiem odbicia (np. wartość ta dla traw i drzew jest zbliżona), oraz kiedy długość fali nie pozwala na jednoznaczną separację punktów [4].

Z kolei jedną z najprostszych metod przeszukiwania punktów odpowiadających kryteriom przynależności do terenu, często używaną jako pierwszą w procesie filtracji danych, jest badanie najbliższego sąsiedztwa punktów poddanych analizie. Funkcję taką spełniają obliczenia dokonywane na podstawie profili. Różnice wartości wysokości pomiędzy sąsiednimi punktami będą stanowiły progową dla dalszych analiz.

Istnieje wiele aplikacji wykorzystujących różne metody filtracji, umożliwiając wyodrębnienie poszczególnych elementów pokrycia terenu wraz z ich dokładną charakterystyką: wysokością, kształtem czy dokładnymi wymiarami.

Największym problemem przy filtracji danych z LSL jest sytuacja, gdy obok budynków znajduje się np. gęsta roślinność. Wówczas trudno jest rozróżnić te dwa rodzaje obiektów. W takich sytuacjach stosowane są dodatkowe algorytmy filtracji danych bazujące albo na cechach geometrycznych (regularne poligony dla budynków i nieregularne kształty charakterystyczne dla roślinności), albo na informacji o intensywności odbicia sygnału, które jest zależne od typu obiektu [1, 2].



Rys. 2. Wykrywanie krawędzi budynków i wygładzanie wynikowych modeli [5]

Z kolei, jeżeli NMT wygenerowany został w postaci rastra, wyniki filtracji muszą być przekonwertowane do postaci danych wektorowych. Jest to szczególnie przydatne w przypadku wykorzystywania modeli w systemach informacji geograficznej.

Z uwagi na charakter NMPT w formacie rastrowym we wstępnych wynikach segmentacji czy filtracji danych widoczne są nieregularne krawędzie wyodrębnionych budynków, które muszą być wygładzane (rys. 2) [5].

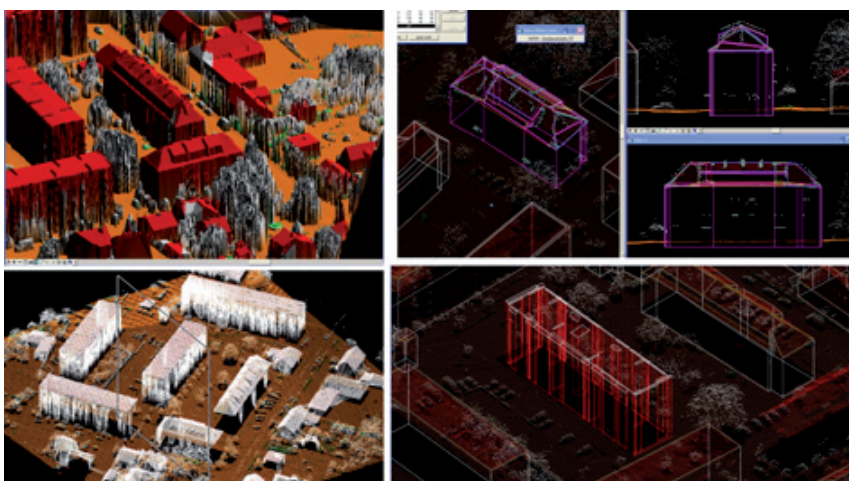
Popularnie stosowanymi algorytmami są algorytmy ortogonalizacji, generalizacji i „dociągania” kształtów do znanych figur geometrycznych: prostokątów, kwadratów itp. Rysunek 2 przedstawia wyniki „wygładzania” krawędzi budynków i automatycznego usuwania zbędnych wierzchołków.

3. Modele 3D

Istnieje kilka możliwości rekonstruowania budynków z chmur punktów. Najbardziej popularnymi są:

- tworzenie siatek trójkątów — TIN,
- segmentacja,
- wektoryzacja,
- filtracja — filtry morfologiczne,
- uzupełnianie modeli teksturą ze zdjęć.

Rysunek 3 przedstawia wyniki modelowania podstawowymi technikami: cieniowanie, wektoryzacja oraz tworzenie siatki trójkątów opracowane w programie TerraModeler.



Rys. 3. Modele wykonane na podstawie chmur punktów pochodzących z lotniczego skaningu laserowego — cieniowanie, wektoryzacja i siatki trójkątów (oprac. własne)

3.1. Budynki

Budynki są najważniejszymi elementami trójwymiarowych modeli miast. Modele opracowywane manualnie są bardzo dokładne, ale wymagające dużych nakładów pracy finansowych i czasowych.

Modele budynków mogą być podzielone na dwie części: modele dachów (płaszczyzn górnych) oraz modele elewacji i wewnątrz. W zależności od rodzaju danych możemy wyróżnić różne algorytmy modelowania danych.

3.2. Metody modelowania 3D

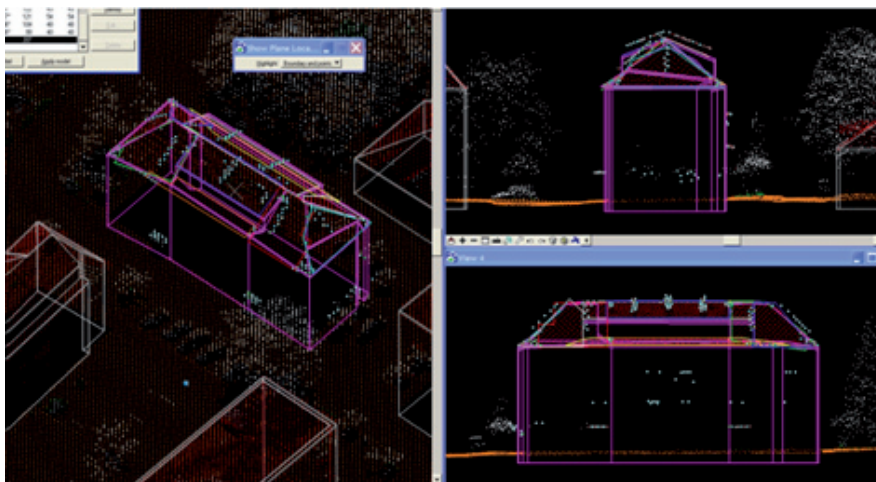
Modelowanie oznacza w grafice 3D sposób wykonania oraz manipulowania przedmiotami trójwymiarowymi z wykorzystaniem profesjonalnego programu komputerowego określanego mianem modelera. Zawiera on pakiet specjalistycznych narzędzi oraz zestaw gotowych już figur (ang. *Primitives*) w postaci kul, walców, prostopadłościanów, torusów, stożków i innych, wykorzystywanych do modelowania 3D obiektów. Tworzenie przedmiotów 3D odbywa się na podstawie siatek wielokątów bądź definiowane jest za pomocą krzywych parametrycznych NURBS (ang. *Non-Uniform Rational B-Spline*). Zaletą siatki wielokątów jest możliwość dowolnego kształtowania obiektów, natomiast krzywe parametryczne umożliwiają tworzenie gładkich powierzchni w naturalny sposób.

Istnieje wiele metod modelowania danych z lotniczego skaningu laserowego. Systemy CAD (ang. *computer-aided design*) umożliwiają szkicowanie i modelowanie geometryczne. Modele geometryczne zapisywane cyfrowo w omawianych systemach przedstawiane są za pomocą technik 2D, 2.5D, 3D. Do najbardziej efektywnych zalicza się modelowanie w systemach CAD-owskich — modelowanie krawędziowe, modelowanie powierzchniowe, bryłowe (*Constructive solid geometry*) oraz modelowanie krzywymi, np. NURBS.

Popularnymi metodami modelowania budynków są metody **parametryczne**, gdzie modeluje się proste kształty budynków — zarys bryły budynku, ale również między innymi płaskie czy piramidalne dachy. W tym celu używa się znanych brył geometrycznych, takich jak prostopadłościany, kule, stożki, cylindry itp.

Modelowanie **krawędziowe** (ang. *wireframe*) — przedstawia obiekt szkieletowe za pomocą linii oraz krzywych, które reprezentują krawędzie danego przedmiotu. Narzędzia wykorzystywane przy ich generowaniu to odcinek i linia. Możliwe jest również wykonanie modelu za pomocą obiektów płaskich umieszczonych w dowolnym miejscu trójwymiarowej przestrzeni.

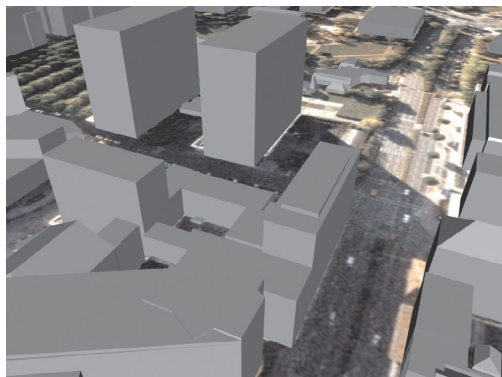
W przypadku modelowania **powierzchniowego** (ang. *surface*) obiekty są przedstawiane za pomocą powierzchni odwzorowujących powierzchnię brzegową modelu. Obiekty siatkowe, w odróżnieniu od modeli bryłowych, nie posiadają cech fizycznych, takich jak masa czy ciężar. Tak zwane „obiekty ściankowe” nie odzwierciedlają



Rys. 4. Przykład modelu opartego wyłącznie na krawędziach budynku (oprac. własne)

wnętrza obiektu i nie można przeprowadzić na nich operacji logicznych (dodawania, odejmowania, część wspólna). Umożliwiają natomiast ukrycie linii niewidocznych oraz cieniowanie. Obiekty powierzchniowe stosowane są przy odwzorowywaniu powierzchni o kształcie nieregularnym, np. powierzchni terenu [15].

Modelowanie **bryłowe** (ang. *Constructive Solid Geometry*) definiowane jest za pomocą obiektów trójwymiarowych. Modelowanie bryłowe odwzorowuje zarówno brzegi obiektu jak i jego wnętrze. Obiekty wykonane tą metodą najwierniej oddają ich stan rzeczywisty oraz umożliwiają przeprowadzenie na bryłach działań logicznych (dodawania, odejmowania, część wspólna). Bryły można wykonywać następującymi metodami: poprzez wyciągnięcie obiektu płaskiego, użycie brył elementarnych (prostokątów, walców, stożków, ostrosłupów, torusów), obrót wokół osi w przestrzeni, wycinanie fragmentów z innych brył (rys. 6).



Rys. 5. Fragment modelu miasta wykonany metodą bryłową [6]

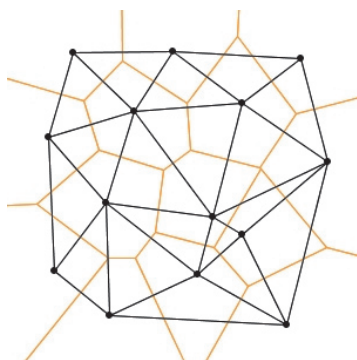
Modelowanie NURBS to interaktywne modelowanie krzywych trójwymiarowych i powierzchni z wykorzystaniem zależności matematycznych. Kształt krzywych określany jest za pomocą punktów kontrolnych i jest odpowiedni do modelowania kształtów organicznych w programach graficznych 3D [14].

W modelowaniu NURBS definiuje się matematycznie podstawowe obiekty geometryczne (kule, linie, koła, elipsy, stożki, prostopadłościany itd.). Wykonanie skomplikowanych i bardziej złożonych kształtów również nie stwarza problemów.

Do wykonania fragmentu geometrii potrzebna jest niewielka ilość informacji, co wyróżnia tę technikę spośród innych metod opisu obiektów przestrzennych. Metodę NURBS oferują takie programy jak: 3D Studio Max, Bender, Maya, umożliwiając przenoszenie geometrycznych modeli pomiędzy sobą.

Modelowanie z wykorzystaniem techniki NURBS jest bardzo skomplikowane i złożone, lecz pomimo tego znajduje zastosowanie w modelowaniu rzeźb czy skomplikowanych elementów architektonicznych np. budynków zabytkowych [14].

W przypadku modelu zbudowanego z nieregularnej siatki trójkątów, wierzchołki figur są punktami pochodzącymi z bezpośrednich pomiarów, dodatkowo wspartymi liniami szkieletowymi i punktami charakterystycznymi rzeźby terenu. Najczęstszą metodą tworzenia takich struktur jest **Triangulacja Delaunaya**. Charakteryzuje się tym, że żaden z punktów z tego zbioru nie trafia do wnętrza okręgu opisanego na trójkącie jakiegokolwiek innego trójkąta powstałego podczas triangulacji [9].



Rys. 6. Diagramy Voronoi (pomarańczowy) i triangulacja Delaunaya (czarny) [8]

Algorytm tworzenia nieregularnej siatki trójkątów musi mieć możliwość zmiany boków trójkątów na podstawie znajomości spadków oraz musi z założenia prowadzić boki wzdłuż linii szkieletowych grzbietowych i ściękowych. Dane wygenerowane w procesie triangulacji należy przechowywać w strukturach zapewniających szybki i wygodny dostęp. Jednym z wariantów jest zapis danych w postaci trzech tablic:

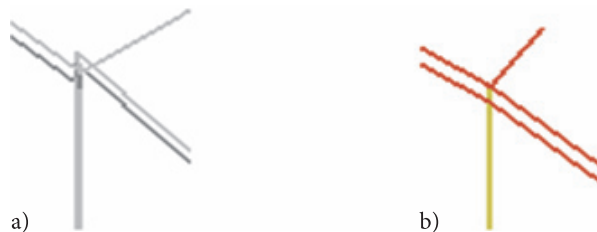
- punktów ze współrzędnymi X, Y, H ,
- boków ze wskaźnikami do punktów i przyległych trójkątów,
- trójkątów ze wskaźnikami do boków.

Mając model w postaci nieregularnej siatki trójkątów, możemy interpolować wysokość punktu powierzchni terenowej, wykorzystując rzut tego punktu na płaszczyznę poziomą i aproksymując wartości współrzędnych, wagując wysokości punktów polami powierzchni sąsiednich trójkątów [7].

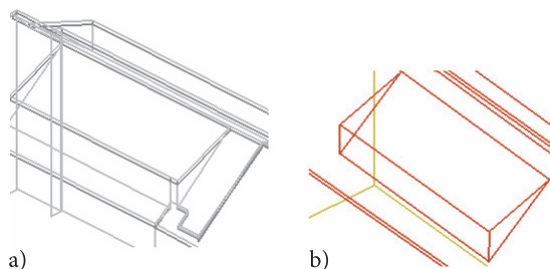
3.3. Wybrane problemy modelowania budynków

Podstawowym przetwarzaniem danych z LSL jest filtracja danych, w tym przypadku rozumiana jako klasyfikacja przynależności obiektów do poszczególnych warstw: budynki, wysoka i niska roślinność, grunt. W zależności od rodzaju i konstrukcji budynku oraz zastosowanego algorytmu i odpowiedniego doboru jego parametrów otrzymujemy dane, które są podstawą wykonania modelu. Porównując dwie metody opracowania modeli 3D: automatyczną i manualną, zauważalne są zalety i wady obu rozwiązań. Metoda automatyczna jest dużo szybsza, ale z kolei powstaje w modelach wiele błędów. Do najczęstszych błędów automatycznej wektoryzacji budynków można zaliczyć: błędną interpolację płaszczyzn dachów, błędy łączenia i przecinania się płaszczyzn (rys. 7), wysoki stopień generalizacji (pominięcie szczegółów w skomplikowanej konstrukcji dachów).

W przypadku dachów o prostej strukturze oba modele nie różnią się znacznie. Problemy i błędy pojawiają się w przypadku dachów typu czterospadaowego z lukarnami (rys. 8), dachów wielopoziomowych czy kabłąkowatych.



Rys. 7. Łączenie kilku płaszczyzn: (a) błędne na modelu automatycznym; (b) poprawne na modelu manualnym (oprac. własne)



Rys. 8. Model lukarny: a) błędny model wykonany automatycznie; b) model opracowany manualnie (oprac. własne)

Na podstawie wykonanych modeli i analiz (przedstawionych w artykule skrótowo), można zauważyć, że dane z LSL pozwalają na osiągnięcie modelu 3D miasta jedynie na poziomie LoD2. Dokładność i szczegółowość takiego modelu będzie uwarunkowana między innymi gęstością i dystrybucją punktów, a także metodą filtracji czy klasyfikacji chmury punktów.

4. Generalizacja, poziomy szczegółowości

W przypadku wielu zastosowań, np. symulatorów jazdy, korytarzy czy wizualizacji projektów architektonicznych, wymagane są fotorealistyczne i dokładne modele. Jednak nie wszystkie zastosowania wymagają takiej dokładności, wręcz przeciwnie — niejednokrotnie ważnym zagadnieniem jest generalizacja danych w celu optymalizacji objętości powstałych modeli. W ujęciu kartograficznym wyróżniamy generalizację tematyczną (uwzględniającą bądź pomijającą elementy w danej grupie tematycznej). Istnieje również pojęcie generalizacji w zależności od stopnia złożoności obiektu i modelu. *Open Geospatial Consortium* (OGC) opracowało w postaci standardu CityGML szczegółowe wytyczne dotyczące modelowania terenów zurbanizowanych.

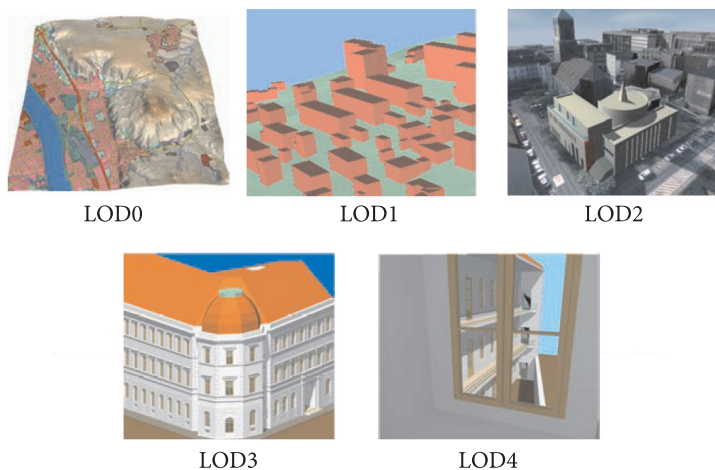
CityGML jest standardem dotyczącym modeli semantycznych bazujących na formacie XML, za pomocą którego przechowywane są i wymieniane dane. CityGML definiuje klasy i relacje pomiędzy obiektami topograficznymi, uwzględniając ich geometryczne, topologiczne i semantyczne właściwości. Pod pojęciem „miasta” rozumiane są nie tylko budynki, ale również:

- tereny otwarte — poziom powierzchni ziemi,
- elementy uliczne (tzw. meble uliczne),
- roślinność (parki, zieleńce, skwery),
- obiekty ruchome,
- punkty orientacyjne.

Model może być przedstawiony jednocześnie w różnych poziomach szczegółowości przypisanych różnym klasom obiektów: od prostych elementów niewymagających topologii, poprzez bardziej skomplikowane obiekty, aż do szczegółowych i złożonych modeli.

Jedną z najważniejszych cech modeli 3D miast jest poziom szczegółowości modeli określany pojęciem LoD (ang. *Level of Details*). Wyróżnionych zostało pięć poziomów szczegółowości.

Poziom o największym stopniu uogólnienia LoD0 jest poziomem Numerycznego Modelu Terenu 2.5D, który może być pozyskany z mapy lub ze zdjęć lotniczych po odpowiednim ich przetworzeniu. Poziom LoD1 jest modelem „blokowym” złożonym z brył geometrycznych. Dachy są powierzchniami płaskimi, w przeciwieństwie do LoD2, gdzie bryła budynku pozostaje, ale uwzględniona jest wizualizacja kształtu



Rys. 9. Poziomy szczegółowości (LoD) definiowane przez OGC (IKG, Bonn) [10]

pokrycia budynków — dachy posiadają dokładny model konstrukcji. Często modele na tym poziomie uzupełnione są teksturą ze zdjęć lotniczych lub naziemnych, a także informacją o roślinności. LoD3 oznacza, że model oprócz elementów z grup szczegółowości niższych zawierać będzie detale architektoniczne znajdujące się przy ścianach, np. balkony, gzymsy. LoD4 obejmuje informacje z LoD3 łącznie z modelem wnętrza budynku (pomieszczenia, drzwi wewnętrzne, schody itp.).

Poziomy szczegółowości charakteryzowane są również poprzez dokładności modelu oraz minimalne wielkości obiektów modelowanych. OGC zdefiniowało pewne standardy, jednak nie są one wiążące, wytyczne te mogą być jedynie sugestią. I tak, w poziomie LoD1 dokładność pozioma i wysokościowa modelu (obiektu o wymiarach nie mniejszych niż 6 m × 6 m) musi osiągać wartości do 5 m. Dokładność ta określana jest za pomocą odchylenia standardowego wszystkich współrzędnych przestrzennych punktów. Dla pozostałych poziomów otrzymujemy odpowiednio: 2 m, 0,5 m i 0,2 m (tab. 1).

TABELA 1

Wymagania dokładnościowe i szczegółowe dla różnych poziomów szczegółowości według standardu OGC [10]

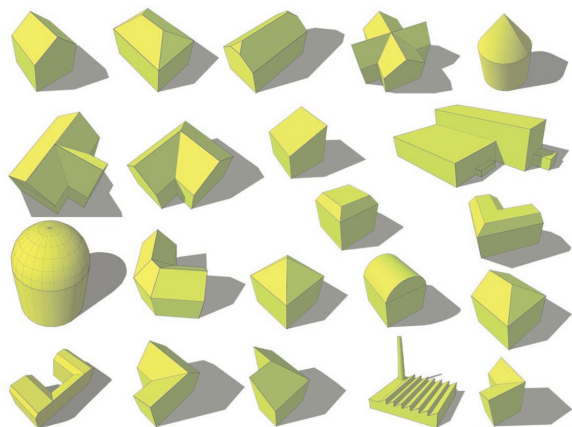
	LoD0	LoD1	LoD2	LoD3	LoD4
Wymiar obiektu/ /generalizacja	Maksymalny obszar NMT	Obiekty zgeneralizowane do 6 × 6 m/3 m	Obiekty zgeneralizowane do 4 × 4 m/2 m	Obiekty zgeneralizowane do 2 × 2 m/1 m	Istotne detale konstrukcji
Dokładność pozioma/ /wysokościowa	Niższa niż w poziomie LoD1	5/5 m	2/2 m	0,5/0,5 m	0,2/0,2 m

5. Modelowanie powierzchni dachów

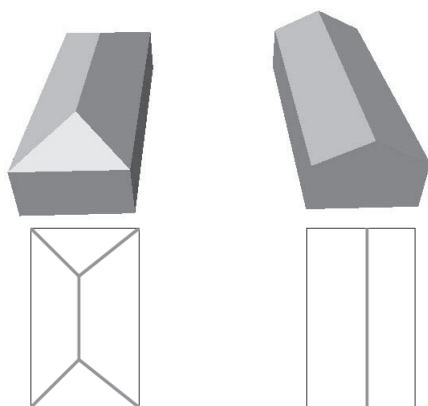
Budynki są obiektami o różnorodnych typach i kształtach nie tylko całej konstrukcji, lecz także dachów.

Większość modeli budynków przedstawionych jest w postaci prostych brył z płaskimi dachami, co jest błędną i mało szczegółową prezentacją, ograniczającą zdecydowanie zastosowanie wykonanych modeli 3D [11, 12]. Wiele budowli, zwłaszcza nowoczesnych, posiada bardziej złożoną konstrukcję. Na rysunku 10 przedstawiono wybrane typy dachów najczęściej spotykanych w miastach.

Najbardziej popularnymi rodzajami dachów są dachy płaskie, ścięte i spadziste (rys. 11) [5].



Rys. 10. Przegląd wybranych modeli typów dachów stosowanych w budowaniu trójwymiarowych modeli miast [13]



Rys. 11. Dachy: ścięte i spadzisty u góry — modele 3D, poniżej rzuty z góry dachów [5]

Dachy płaskie mają mały spadek, dlatego dzięki np. analizie spadków można wykryć i zdefiniować typ pokrycia budynku. Wówczas wysokość budynku definiowana jest poprzez średnią wartość wysokości obliczoną na podstawie krawędzi budynku.

Dachy spadziste i ścięte mają różną linię „grzbietową”. Dachy spadziste cechują się jedną górną krawędzią biegnącą równolegle do dłuższej krawędzi budynku, zaś w przypadku dachów ściętych linia ta dzieli się na segmenty rozchodzące się w różnych kierunkach. Aby określić dokładnie wysokości poszczególnych fragmentów dachu, należy określić spadki na wybranych charakterystycznych częściach dachu oraz wyznaczyć wysokości górnej krawędzi (grzbietu) wraz z wysokościami poszczególnych wierzchołków dachu. Wszystkie wartości wysokości są uśredniane z kilku linii lub wierzchołków czy krawędzi.

Podsumowanie

Trójwymiarowe modele miast znajdują coraz szersze zastosowania w gospodarce i nauce. Wiąże się to z rosnącymi wymogami dokładnościowymi. Najszybszą metodą pozyskiwania danych o powierzchni terenu jest lotniczy skaningu laserowy. Wykorzystując tę metodę pomiaru, możemy pozyskać bardzo dokładne modele powierzchni dachów zarówno prostych, płaskich, jak i tych o skomplikowanym i nieregularnym kształcie. Tak dokładne modele 3D miast mogą znaleźć zastosowanie np. w oddziałach zarządzania kryzysowego, zwłaszcza gdy potrzebne są dokładne modele 3D miast czy Numeryczne Modele Terenu, choćby obszarów zagrożonych powodzią czy dotkniętych klęską żywiołową.

Artykuł wpłynął do redakcji 5.07.2010 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w marcu 2011 r.

LITERATURA

- [1] N. HAALA, C. BRENNER, *Extraction of building and trees in urban environments*, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54, 2-3, 1999, 130-137.
- [2] C. HUG, *Extracting artificial surface objects from airborne laser scanner data*, Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II) (A. Gruen, E. P. Baltsavias, O. Henricsson, editors), Birkhauser Verlag, 1997, 193-202.
- [3] S. MIKRUT, U. MARMOL, K. BĘDKOWSKI, *Generowanie NMT i NMPT obszarów z pokrywą roślinną na podstawie danych lidarowych*, Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, 2006, 2-3.
- [4] J-H. SONG, S-H. HAN, K. YU, Y. KIM, *Assessing the possibility of land-cover classification using LIDAR intensity data*, ISPRS Commission III, PCV02.
- [5] *Automated Building Extraction and Reconstruction from LIDAR Data*, project NASA, Mr. Tim Haithcoat (GRC Program Director) Mr. Wenbo Song (Research Specialist — GRC) Dr. James Hipple (PI).
- [6] J. BÖHM, *Terrestrial Laser Scanning — A Supplementary Approach for 3D Documentation and Animation*, Stuttgart, 2006.
- [7] W. IZDEBSKI, *Wykłady z SIT*, <http://www.izdebski.edu.pl>.

- [8] http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Voronoi_delaunay.jpg
- [9] http://riad.usk.pk.edu.pl/~zk/GO_LAB_00/triangulacja/voro.htm.
- [10] G. GRÖGER, T. H. KOLBE, A. CZERWINSKI, *Candidate OpenGIS CityGML Implementation Specification (City Geography Markup Language)*, Open Geospatial Consortium Inc. Reference number of this document: OGC 06-057r1 Version: 0.3.0, 2006.
- [11] R. NEVATIA, C. LIN, A. HUERTAS, *A system for building detection from aerial images, Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Image*, II, (A. Gruen, E. P. Baltsavias, O. Henricsson, editors), Birkhauser Verlag, 1997, 77-86.
- [12] L. SAHAR, A. KRUPNIK, *Semiautomatic extraction of building outlines from large-scale aerial images*, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65, 4, 1999, 459-465.
- [13] M. KADA, *The 3D Berlin project*, Stuttgart.
- [14] C. BRENNER, *Dreidimensionale gebaederekonstruktion aus digitalen oberflaechenmodellen und grundrissen*, Technical Report Deutsche Geodaetische Kommission, Reihe C, Nr. 530, München 2000, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/>, 2000.
- [15] D. W. FELLNER, M. LANCELLE, *Current issues on 3D city models*, Computer Graphics, University of Technology at Braunschweig, 2003/2004.
- [16] W. FOERSTNER, *Automatische 3D Objekterfassung und Ferkennung*, Institut für Photogrammetrie, Universität Bonn.
- [17] G. SOHN, I. DOWMAN, *Terrain surface reconstruction by the use of tetrahedron model with the MDL Criterion*, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34, Pt. 3A, 2002, 336-344.
- [18] H. G. MASS, G. VOSSELMAN, *Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data*, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, 2-3, 1999, 153-163.
- [19] N. PIECHOCKA, U. MARMOL, J. JACHIMSKI, *Stereometryczna weryfikacja DTM uzyskanego ze skaningu laserowego*, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 14, 2004.

A. FRYŠKOWSKA

Analysis of using aerial laser scanning data in 3D city models generation

Abstract. Nowadays, more than 50% of human population lives in the urban areas, therefore there is an increasing demand for 3D urban modelling. The issue of visualization of cities have appeared at the beginning of this century. The three-dimensional city models exist since a few years and currently this building information is extremely important for many applications such as urban planning, telecommunication, navigation, geographic information systems or environment monitoring etc. There are many methods of 3D city models generation. The most important are: models generation on the basis of aerial and satellite imagery (automatic image correlation) and in the past a few years also very popular method was aerial laser scanning, commonly named LIDAR. It enables acquiring data to generate Digital Surface Models. This DSMs have to be filtrated and then from this data we detect buildings, extract them and as the last phase — there is a building reconstruction by boundary extraction. This paper presents the analysis of using LIDAR data to accurate building detection and extraction for the use of 3D city modelling and it also reviews methods of LIDAR point cloud filtration and methods of 3D city modelling from aerial laser scanning systems. I will describe also some analysis connected with CityGML — the standard created by Open Geospatial Consortium. CityGML is a common semantic information model for the representation of 3D urban objects that can be shared over different applications, characterized by generalization — different accuracies and minimal dimensions of objects.

Keywords: photogrammetry, 3D city models, LIDAR, filtration, DSM, building extraction