

ANALIZA PRZYDATNOŚCI LOTNICZEGO SKANINGU LASEROWEGO DO OPRACOWANIA MODELU BUDYNKÓW 3D ZGODNEGO ZE SPECYFIKACJĄ INSPIRE

ANALYSIS OF USEFULNESS OF AIRBORNE LASER SCANNING FOR PREPARATION OF 3D BUILDINGS MODEL CONSISTENT WITH INSPIRE SPECIFICATION

Urszula Cisło-Lesicka¹, Natalia Borowiec¹, Urszula Marmol¹, Krystian Pyka¹

¹ AGH w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska
Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska

SŁOWA KLUCZOWE: ALS, INSPIRE, model 3D, GIS 3D, budynki

STRESZCZENIE: Inspiracją do podjęcia tematu było ogłoszenie przygotowań do projektu Polska 3D+. Po przedstawieniu tła analizy metod modelowania przypomniano zasady modelowania budynków, narzucone przez specyfikację INSPIRE. Omówiono uwarunkowania konwersji bazy danych przestrzennych 2D do 3D, na podstawie doświadczeń pozyskanych dzięki projektowi badawczemu wykonywanemu w AGH w latach 2009-2012. Badania wskazały na skaningu lotniczy jako najlepsze źródło danych ale jednocześnie wykazały, że modele o wysokiej szczegółowości rozważane dla dużego obszaru mogą okazać mało wydajne dla technologii GIS. Przedstawiono systematyzację metod modelowania ze skaningu lotniczego z wyartykułowaniem zalet i wad podejścia parametrycznego i nieparametrycznego. Praca kończy się propozycją strategii modelowania w kontekście stanu georeferencyjnych baz danych w Polsce, perspektyw ich rozwoju oraz zapotrzebowania na dane przestrzenne z punktu widzenia społecznego i gospodarczego. Zaproponowano rozwiązanie etapowe, w którym w pierwszej próbie się zastosować metodę parametryczną a w przypadku niepowodzenia przechodzi się do metody nieparametrycznej, co pozwala wymodelować budynki o złożonych kształtach, ale nie gwarantuje pełnej automatyzacji. Takie postępowanie zdaniem autorów byłoby optymalne przy realizacji projektu Polska 3D+.

1. WPROWADZENIE

Obecnie, już prawie w połowie drugiej dekady XXI wieku można stwierdzić, że mapy analogowe zostały całkowicie wyparte przez systemy informacji geograficznej (GIS). Stało się tak w przeciągu zaledwie kilkunasta lat (dotyczy to wielu państw, w tym także Polski). Droga od mapy analogowej do GIS nie polegała tylko na konwersji postaci danych, gdyż nowa technika wniosła wiele nieznanych dotąd funkcjonalności, w tym możliwość prowadzenia analiz przestrzennych. Ale zauważmy, że w GIS zapisuje się dane przestrzenne zgodnie z tradycją geodezyjną i kartograficzną, polegającą na rozdzieleniu

przestrzeni na komponent 2D i 1D. Co prawda warstwy zostały zastąpione w GIS przez NMT, jednak dualizm pozostał.

Dopiero ostatnie lata to czas tworzenia GIS-u 3D. Efekty tych działań są widoczne w Internecie, jednak w większości są to wizualizacje 3D (np. Google Earth). Takie wizualizacje są często bardzo efektowne, komunikatywne, ale nie są to modele o oczekiwanych cechach GIS, gdyż nie zawierają obiektów o zdefiniowanej tożsamości. Nie można jednak kontestować ich przydatności i przekreślać perspektyw rozwoju. A rozwój idzie m.in. w kierunku wzbogacania prezentacyjnych geo-serwisów 3D o funkcje interaktywne, w tym służące pomiarowi odległości, powierzchni, pozycji. Takie funkcjonalności, znane z GIS, często zacierają przeciętnemu użytkownikowi różnice pomiędzy wizualizacją 3D a modelem 3D typu GIS. Pierwszym projektem typu GIS, w którym zdefiniowano obiekty 3D z wykorzystaniem standardów ISO był CityGML (Kolbe i Gröger, 2003; Kolbe *et al.*, 2011).

W ostatnich latach w Polsce podjęto wiele projektów geoprzestrzennych o zasięgu krajowym. Jednym z nich jest Baza Danych Obiektów Topograficznych (BDOT10k), która jest bliska ukończenia. BDOT ma dobrze zdefiniowany model pojęciowy, posiada szerokie, aczkolwiek nie w pełni wykorzystane, możliwości aplikacyjne. Kolejnym z projektów centralnych jest ISOK (Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami), a ściślej jego geodezyjna część, czyli lotniczy skaniny laserowy (Kurczyński i Bakula, 2013). Owocem projektu ISOK są wysoko dokładne modele NMT i NMPT, których zasięg obejmie w 2015 r. 92% powierzchni kraju, a wkrótce potem rysuje się perspektywa pełnego pokrycia. Nasuwa się pytanie, czy można oba wymienione projekty tak zintegrować, aby uzyskać bazę 3D choćby wybranych obiektów? Takie pytanie prowokuje następne: czy warto, a może lepiej tworzyć bazę 3D od nowa, bez balastu dotychczasowych dokonań?

Odpowiedzi na postawione pytania wymagają szerokiej, kompleksowej analizy, w której szereg czynników trudno zdefiniować. Stosunkowo najłatwiej udzielić odpowiedzi na pytanie: jakie techniki pozyskiwania danych 3D i metody ich przetwarzania są optymalne do tworzenia modeli 3D typu GIS? Pytanie warto rozważyć w kontekście zainicjowanego w 2007 roku europejskiego przedsięwzięcia zmierzającego do budowy infrastruktury informacji przestrzennej, określanego jako INSPIRE.

2. MODELE 3D BUDYNKÓW W INSPIRE

INSPIRE zakłada utworzenie w państwach UE infrastruktury do końca obecnego dziesięciolecia; pierwsze efekty, także w Polsce, są już widoczne (Gaździcki, 2009). O ile formalna transpozycja dyrektywy do systemu prawnego państw członkowskich już się zakończyła, to spośród 34 tzw. tematów tylko dziewięć (wszystkie, które tworzą I grupę tematyczną) ma opracowane specyfikacje danych. Prace nad specyfikacjami pozostałymi tematami wciąż trwają, a jednym z nich jest temat „budynki”. Jak wynika ze specyfikacji* opublikowanej pod koniec 2013 roku dopuszczone będą dwa warianty budynków: 2D i 3D

* <http://inspire.ec.europa.eu>

(tzw. profile). Specyfikacja budynków 3D korzysta ze standardu CityGML. Standard ten, jak wcześniej podkreślono, jest najbardziej dojrzałą propozycją modelowania 3D o charakterze obiektowym.

Jedną z fundamentalnych cech CityGML jest wieloskalowość, czyli wyróżnienie czterech poziomów szczegółowości modeli (levels of detail – LoD), (OGC 2012):

LoD 1 – budynki przedstawiane z płaskimi dachami,

LoD 2 – kształty dachów oddają przebieg głównych połączeń, pomijane są drobne elementy i instalacje wentylacyjne,

LoD 3 – dachy są modelowane bardziej detalicznie, bryły budynków są uzupełniane o otwory w ścianach i dachach,

LoD 4 – przedstawiany jest model wnętrza budynku.

Uzupełnieniem jest LoD 0, w którym budynki 2D są umieszczone na modelu terenu (NMT). Ten dodatkowy poziom szczegółowości dopełnia zakres skalowy, w jakim mogą być prezentowane modele. Nazywa się go poziomem regionalnym, a poziom LoD 1 określa się jako odpowiedni do prezentacji miast. Następny poziom, LoD 2, to już skala dzielnicy, a LoD 3 i LoD 4 to skala zespołu budynków lub pojedynczego obiektu. Ostatnie dwa poziomy reprezentują porównywalny poziom szczegółowości i dokładności geometrycznej, gdyż są przedstawieniem zewnątrz i wewnątrz budynku.

Reprezentacja obiektów w CityGML ma charakter semantyczno-geometryczno-topologiczny. Oznacza to, że obiekty wyposażone są w ściśle zdefiniowane atrybuty opisowe a geometria zapisywana jest w postaci powierzchni ograniczających (tzw. reprezentacja brzegowa – B-Rep) z zachowaniem topologii. Obecna wersja CityGML 2.0, która ma status standardu Open Geospatial Consortium, charakteryzuje się ponadto modularnością, poza budynkami (core module) zawiera modele wielu innych grup obiektów (extension modules) (OGC, 2012).

Specyfikacja budynków INSPIRE wykorzystuje podstawowe założenia CityGML, przejmuje zasady geometryczne a uszczegóławia stronę semantyczną, podając np. słowniki dla atrybutów i dzieląc je na obligatoryjne i fakultatywne. Zawiera także przykłady geometrycznej reprezentacji budynków o nietypowej architekturze, w tym z nawisami, przelączkami czy złożonymi z wielu brył. Specyfikacja rekomenduje minimalne skale prezentacji dla poszczególnych poziomów szczegółowości, od 1:25000 dla LoD 0 - do 1:1000 dla LoD 4.

Podsumowując to syntetyczne ujęcie modelowania 3D budynków w specyfikacji INSPIRE należy podkreślić, że dokument skupia się na produkcie końcowym, a nie ustosunkowuje się w żaden sposób do metod pozyskiwania danych. W specyfikacji zaproponowano alternatywne opracowanie tematu budynki według profilu 2D lub 3D pozostawiając państwu członkowskim UE decyzję o wyborze realizowanego wariantu. Wiadomo, że w wielu krajach istnieją bazy danych o budynkach 2D stanowiące element systemu katastralnego lub bazy danych topograficznych. W takich przypadkach najszybszą i najtańszą metodą opracowania tematu budynki jest skompletowanie atrybutów opisowych wg specyfikacji INSPIRE. Ponieważ w tym dokumencie profile 2D i 3D mają wspólną część semantyczną, toteż w sposób naturalny nasuwa się sugestia, aby w pierw utworzyć temat w wersji dwuwymiarowej a następnie uzupełnić go o trzeci wymiar. Takie podejście

wydaje się pragmatyczne, ale rodzi się pytanie, czy sukcesywne przechodzenie z 2D do 3D nie okaże się zbyt skomplikowane ze względu na konieczność zupełnie nowego ujęcia geometrii budynków.

3. UWARUNKOWANIA KONWERSJI BAZY DANYCH PRZESTRZENNYCH 2D DO 3D

W większości krajów europejskich zostały opracowane bazy danych topograficznych. Ich genezą było przeniesienie zasobu informacyjnego analogowych map topograficznych, najczęściej o skali 1:10000, do baz danych, stanowiących jądro systemu GIS. W Polsce jest to Baza Danych Obiektów Topograficznych, określana jako BDOT10k. W ramach badań wykonanych w AGH przeanalizowano uwarunkowania konwersji tej bazy do postaci 3D (Cisło-Lesicka, 2013a). Przedmiot badań był zogniskowany na:

- model konceptualny BDOT10k 3D wraz z określeniem zasad reprezentacji obiektów na różnych poziomach szczegółowości,
- formę i szczegółowość przedstawiania budynków w BDOT10k 3D,
- metodykę pozyskania trójwymiarowych danych do bazy BDOT10k 3D wraz z analizą ich przydatności na poszczególnych poziomach szczegółowości.

Szczególną uwagę podczas przeprowadzonych badań poświęcono budynkom, które ze względu na rolę jaką pełnią przy rozpoznawaniu topografii terenu stanowią jedną z najważniejszych klas BDOT10k. Stwierdzono, że najbardziej odpowiednimi poziomami szczegółowości przedstawiania budynków będzie poziom szczegółowości LoD 1 i LoD 2. Pozyskanie modeli 3D budynków w bardziej szczegółowej postaci (LoD 3, czy LoD 4) w skali całego kraju uznano za bardzo kosztowne i czasochłonne. Należy również pamiętać, że tak dokładnie i szczegółowo przedstawiane modele 3D powodują spadek wydajności zarządzania i wizualizacji danych 3D. Stąd w przedstawianych badaniach zaproponowano reguły upraszczania połączeń dachowych oraz innych elementów konstrukcyjnych dachów i samych budynków (np. kominy, anteny, schody, drzwi, itd.).

W ramach badań przeanalizowano trzy metody pozyskiwania trójwymiarowych modeli budynków pod kątem dokładności i przydatności dla poszczególnych poziomów szczegółowości (Cisło-Lesicka, 2013b):

- metoda fotogrametryczna (wektoryzacja modeli stereoskopowych zbudowanych ze zdjęć o GSD 10cm),
- metoda wykorzystująca dane lotniczego skaningu laserowego (dane ALS o gęstości 10-30 pkt/m²),
- metoda wykorzystująca informację o geometrii przyziemia budynków i ilości kondygnacji (dane z ewidencji gruntów i budynków).

Testy wykonano dla trzech obszarów badawczych obrazujących różny charakter i stopień zagęszczenia zabudowy. W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono, że najbardziej efektywną metodą pozyskiwania informacji 3D jest metoda wykorzystująca dane z lotniczego skaningu laserowego (Cisło-Lesicka, 2013b). Ze względu na możliwość automatycznego i półautomatycznego pozyskiwania trójwymiarowych modeli budynków jest to szybka i odpowiednio dokładna metoda dla wszystkich typów zabudowy na obu

rozpatrywanych poziomach szczegółowości (LoD 1 i LoD 2). Należy jednak zaznaczyć, że przy tej metodzie stopień automatyzacji modelowania budynków 3D maleje wraz ze wzrostem zagęszczenia zabudowy i stopniem skomplikowania struktury dachu. W niektórych przypadkach należy się liczyć z manualną wektoryzacją na chmurze punktów. Z kolei metoda fotogrametryczna jest metodą dokładniejszą, ale bardziej pracochłonną i czasochłonną. Natomiast metoda wykorzystująca jedynie informację o kształcie przyziemia i ilości kondygnacji jest najmniej dokładna, ale zdecydowanie najszybsza do pozyskiwania informacji trójwymiarowej o budynkach dla poziomu szczegółowości LoD 1. Metoda ta sprawdza się głównie na terenach o zabudowie jednorodnej, gdzie budynki nie mają bardzo zróżnicowanych wysokości kondygnacji oraz trudnych w interpretacji ilości kondygnacji.

W ramach kolejnych badań przeprowadzonych w 2013 roku* przeanalizowano m.in. przydatność danych ALS pozyskanych w ramach projektu ISOK do pozyskania modeli 3D budynków. Badania pokazały, że dane ALS w standardzie I (4 pkt/m²) są wystarczające do pozyskania modeli 3D budynków na poziomie LoD1, a w standardzie II (12 pkt/m²) zarówno na poziomie LoD1, jak i LoD2. Pewnym utrudnieniem jest pochłanianie impulsów lasera przez powierzchnie czarne (np. papę na dachu) oraz wysoka transmisja impulsów lasera przez powierzchnie przezroczyste (np. szklane świetliki). W takich przypadkach można uzupełnić chmurę punktów wykorzystując metodę *matchingu* na zdjęciach lotniczych.

Badania nad konwersją BDOT10k do postaci 3D pokazały ogrom prac koncepcyjnych i wdrożeniowych, jakie należałoby podjąć, aby zrealizować trójwymiarową wielorozdzielczą bazę danych obiektów topograficznych w Polsce. Czasochłonność oraz kosztowność takiego przedsięwzięcia w skali całego kraju sprawia, że należy starannie rozważyć zasadność pozyskania i przedstawiania poszczególnych obiektów BDOT10k w postaci trójwymiarowej. Należy się zastanowić, do jakich obiektów się ograniczyć i które są najistotniejsze dla potencjalnych użytkowników. Do tych najważniejszych obiektów, których pozyskanie należałoby rozważyć w pierwszej kolejności należą na pewno budynki.

4. MODELOWANIE BUDYNKÓW NA PODSTAWIE CHMURY PUNKTÓW ZE SKANINGU LOTNICZEGO

W modelowaniu budynków na podstawie chmury punktów wyróżnia się dwa podejścia: nieparametryczne (*data driven*), polegające na wyszukiwaniu i aproksymacji płaszczyzn, które mają utworzyć wielościenne bryłę, oraz parametryczne (*model driven*), w którym w pierw przygotowuje się zbiór modeli budynków o typowych dla obszaru bryłach, a potem sprawdza, która bryła najlepiej pasuje do danych (Maas i Vosselman, 1999).

* Badania prowadzone przy współpracy firmy ProGea Consulting nad „Opracowaniem metodyki pozyskiwania wybranych przestrzennych charakterystyk 3D miasta z danych lotniczego skanowania laserowego (ALS)” wykonywanych w ramach projektu „Wiedza, praktyka, kadry – klucz do sukcesu w biznesie” dla pracowników naukowych i mikro, małych, średnich i dużych przedsiębiorstw, współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

4.1 Metody nieparametryczne (*data driven*)

Rozwiązanie zakłada, że budynek można modelować w postaci wielościennej. W celu określenia szkieletu budynku wykorzystuje się dużą liczbę danych uzyskanych z gęstej chmury punktów, pozyskanej z lotniczego skaningu laserowego lub ze zdjęć lotniczych. Aplikowane rozwiązania umożliwiają znalezienie budynków o różnych nietypowych kształtach dachów wraz z małymi detalami pokrywającymi ich powierzchnie. Głównym problemem jest automatyczne tworzenie hipotez na temat kształtu budynku. Algorytm musi bazować na szczegółach, które wykrywane są z danych punktowych, co jest zadaniem trudnym.

W większości dostępnych metod można wyróżnić dwa główne etapy: wykrycie połączeń dachowych oraz ścian bocznych. Wykrywanie płaszczyzn dachów polega na grupowaniu punktów reprezentujących tę samą powierzchnię dachową, bądź jej element. Wśród metod segmentacji płaszczyzn dachu można wyróżnić algorytm RANSAC, transformację Hougha 3D oraz rozrost regionu.

Głównym założeniem algorytmu RANSAC jest to, iż wybrana próbka danych zawiera w sobie oprócz obserwacji prawidłowych, które można wyjaśnić przy użyciu dowolnego modelu matematycznego, obserwacje odstające, niepasujące do modelu. Algorytm dokonuje próby dopasowania płaszczyzny przy użyciu metody najmniejszych kwadratów i usuwa punkty, których odchyłki są największe, po czym przeprowadza dopasowanie ponownie. Po wykonaniu określonej ilości iteracji wszystkie punkty odstające zostają odrzucone i niewłączone do modelu. Efektem końcowym jest uzyskanie płaszczyzny najlepiej dopasowanej w grupę punktów (Tarsha-Kurdi *et al.*, 2007).

Drugim sposobem dopasowania płaszczyzny w chmurę punktów jest transformata Hougha 3D. Istota transformacji Hougha polega na tym, że każda kolejna wartość wejściowa (punkt w przestrzeni), dodaje swój wkład do globalnego rozwiązania (płaszczyzna, której częścią jest dany punkt). Zakłada się, że każda płaszczyzna może być opisana równaniem normalnym:

$$\rho = x \cos \theta \cos \varphi + y \sin \theta \cos \varphi + z \sin \varphi \quad (1)$$

gdzie:

ρ – odległość pomiędzy środkiem układu przestrzennego O a punktem,

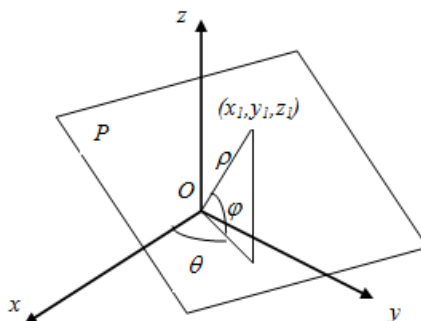
φ – kąt zawarty pomiędzy płaszczyzną OXY a punktem,

θ – kąt zawarty pomiędzy linią łączącą rzut punktu na płaszczyznę OXY z początkiem układu współrzędnych 0 a osią OX (rys.1).

Kąty θ , φ i ρ są to zmienne, gdzie dla każdego kolejnego wartości kątów θ i φ wyznacza się ze wzoru (1), odpowiadającą wartość ρ . W rezultacie każdemu punktowi (x, y, z) w trójwymiarowej przestrzeni $O\rho\varphi\theta$ odpowiada powierzchnia o kształcie sinusoidy.

Zasada działania algorytmu transformaty Hougha 3D polega na podziale przestrzeni $O\rho\varphi\theta$ na woksele i inicjalne przypisanie im wartości zero. Następnie, każdy punkt z chmury jest przekształcany w dyskretną płaszczyznę sinusoidalną w przestrzeni $O\rho\varphi\theta$. Obliczoną wartość ρ dla ciągu wartości parametrów $\theta \in (0^\circ, 360^\circ)$ oraz $\varphi \in (-90^\circ, +90^\circ)$

zaznacza się przez wpisanie jedynek odpowiednim wokselom. W efekcie, jeśli przez dany woksel przejdzie wiele płaszczyzn sinusoidalnych, to osiągnie on stosunkowo dużą wartość w porównaniu z sąsiednimi wokselami. Wówczas współrzędne wokselu o największej wartości opisują płaszczyznę, do której zaliczają się wszystkie te punkty lidarowe, na podstawie których wymodelowano wejściowe powierzchnie sinusoidalne (Borowiec, 2013).



Rys.1 Schemat przedstawiający rozmieszczenie elementów równania płaszczyzny w postaci normalnej (źródło: Tarsha-Kurdi *et al.*, 2007).

Kolejnym sposobem segmentacji punktów odbitych od połaci dachowych jest rozrost regionów. Idea polega na przyłączaniu kolejnych punktów spełniających określone warunki do zbioru. Metoda ta posiada dwa parametry wejściowe: punkt startowy płaszczyzny początkowej, która będzie się rozrastać oraz kryterium dołączania nowych punktów (statystyczne - progowanie, dynamiczne - intensywność, inne - tekstura).

Po wykryciu punktów należących do składowych połaci dachu należy określić związki między sąsiednimi płaszczyznami - opisać kalenice, krawędzie. O ile wykrycie kalenicy dachu jest zadaniem dość prostym, o tyle określenie krawędzi dachu jest zadaniem skomplikowanym. Ameri i Fritsch (2000) proponują zastosować diagram Voronoi. W metodzie tej obszar jest dzielony na pewną liczbę regionów (komórek) o zadanej wysokości wziętej z danych lidarowych. Zidentyfikowanie krawędzi dachu budynku możliwe jest wówczas, gdy porówna się sąsiednie komórki i sprawdzi, czy zwiększa się różnica między nimi. Jeżeli różnica wysokości powiększa się, to należy znaleźć odpowiednie miejsce w danych oryginalnych i przypisać im wysokość centralnej komórki; jeżeli nie to należy pominąć tą komórkę i przejść do analizy kolejnych komórek. Proces powtarza się iteracyjnie, aż do uzyskania prawidłowej krawędzi dachu budynku.

Drugi etap to wymodelowanie płaszczyzn bocznych budynku. W tym celu konieczne jest zdefiniowanie obrysu budynku, który może zostać wykryty przed lub po wykonanej segmentacji połaci dachowych. W pierwszym przypadku konieczne jest wykorzystanie algorytmu generalizacji linii (np. metoda Douglas-Peucker), który upraszcza kontur budynku. W drugim przypadku poligon obrysu budynku określany jest automatycznie podczas segmentacji połaci dachowych. Różnica pomiędzy uzyskanymi płaszczyznami w obu podejściach polega na tym, że w pierwszym przypadku płaszczyzny boczne budynku opisane są kilkoma płaszczyznami pionowymi o zakończeniach w wierzchołkach

zgeneralizowanej linii, w drugim przypadku jest to jedna pionowa płaszczyzna opisana połącją dachową, pod warunkiem, że połąć dachowa została prawidłowo wykryta.

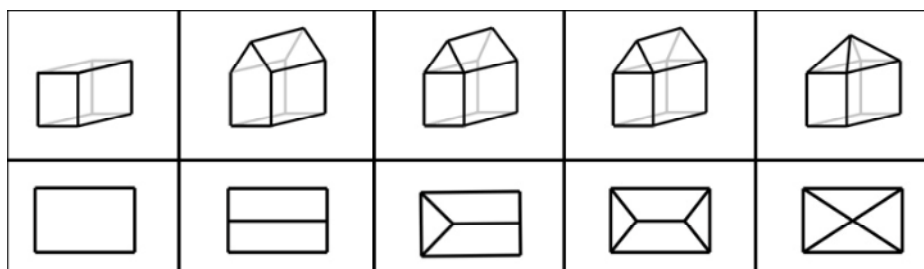
W końcowym etapie identyfikowanie płaszczyzn wzajemnie się przecinających, pozwala wyłonić krawędzie i wierzchołki budynku. Stosując technikę grupowania tworzony jest wektorowy model szkieletowy budynku.

Zaletą podejścia data driven jest fakt, że dąży się do budowy modelu wielościennego, który najwierniej będzie opisywał rzeczywisty budynek. Jednak takie rozumowanie często prowadzi do wydłużenia czasu budowy modelu budynku, a uzyskany model może być nieco zdeformowany. Słabością jest natomiast niska skuteczność dla budynków, których forma geometryczna wywodzi się z powierzchni kulistych czy hiperbolicznych.

4.2. Metody parametryczne (*model driven*)

Metody parametryczne zakładają, że większość dachów, jakie można spotkać w otaczającym świecie może zostać zbudowana z prostych kształtów oraz odpowiednich połączeń pomiędzy nimi (Tarsha-Kurdi *et al.*, 2007, Jarząbek-Rychard, 2012). W tym celu opracowywana jest predefiniowana biblioteka kształtów dachów, ich elementów i połączeń. Zdefiniowanie optymalnej biblioteki kształtów dachów jest zagadnieniem kluczowym dla skuteczności tej metody.

Często spotykane jest najprostsze rozwiązanie, czyli wykorzystanie brył podstawowych, reprezentujących najczęściej spotykane kształty budynków (rys.2).

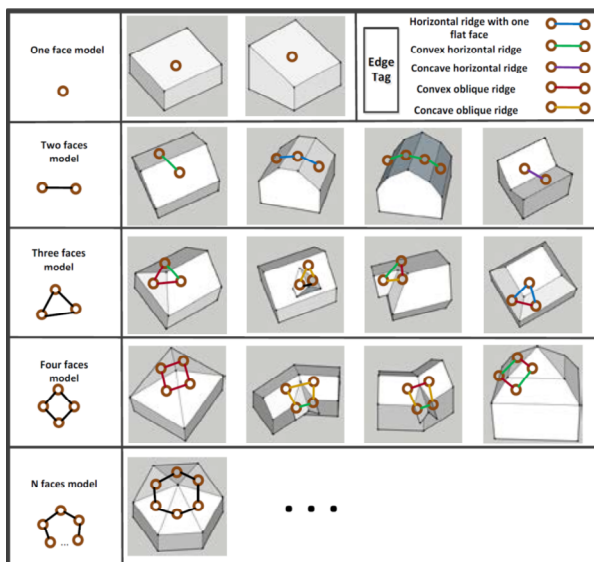


Rys. 2. Biblioteka typowych kształtów dachów. Źródło: (Milde i Brenner, 2009).

Inne rozwiązanie zaproponowali Durupt i Taillandier (2006). Celem badań było opracowanie koncepcji dla masowej produkcji modeli 3D zabudowy. Autorzy wprowadzili obiekty podstawowe w postaci płaszczyzn o różnych stopniach nachylenia. Zostały opracowane dwie metody ekstrakcji modeli budynków. Pierwsza, wyszukująca obiekty podstawowe z wykorzystaniem dwóch parametrów, tj. wysokości rynny i nachylenia dachu. Druga, wspomagająca się danymi katastralnymi i oparta na algorytmie RANSAC.

W (Lafarge *et al.*, 2010) jako obiekty podstawowe zostały wykorzystane komórki 3D, na których podstawie generowane są modele budynków. Na uwagę zasługuje publikacja (Verma *et al.*, 2006), w której autorzy zdefiniowali obiekty podstawowe, jako kształty I, L i U. Biblioteka ta została rozszerzona przez (Oude Elbernick i Vosselman, 2009), uwzględniając takie elementy jak szczyty, naroża dachu i dachy mansardowe.

Alternatywna klasyfikacja została przedstawiona w (Xiong *et al.*, 2013). Obiekty podstawowe są definiowane z wykorzystaniem węzłów. Aby zapewnić strukturze grafu jednoznaczność, wprowadzono pięć atrybutów przecięcia. Pierwsze trzy atrybuty dotyczą przecięć poziomych, pozostałe przecięć nachylonych (rys.3).



Rys. 3. Biblioteka obiektów podstawowych. Źródło: (Xiong *et al.*, 2013).

Drugą istotną kwestią w metodzie model driven jest sposób, w jaki wyszukiwane są modele odpowiadające danym źródłowym. Najczęściej stosowana jest teoria grafów. Cyfrowa reprezentacja grafu zawiera informacje o istniejących ścianach, krawędziach i węzłach. Topologia węzłowa związana jest z wartościami dotyczącymi węzłów, topologia krawędziowa odpowiada za atrybuty krawędzi, natomiast topologia poligonowa pozwala na uzyskanie informacji o ścianach (ESRI, 1994). Teoria grafów pozwala na szybkie i zadowalające wyszukiwanie obiektów podstawowych.

Niestety w przypadku, gdy dane wejściowe posiadają szumy i obserwacje odstające, czy też występuje niska gęstość w chmurze punktów, uzyskane rezultaty nie są miarodajne. Konieczne są algorytmy, które pozwolą na automatyczną korektę uzyskanych modeli budynków. Rozbudowane analizy w tym zakresie zostały przeprowadzone w pracy doktorskiej (Brédif, 2010). Celem badań była poprawa zgeneralizowanych modeli budynków, zawierających różnego rodzaju błędy, zarówno topologiczne, jak też geometryczne. Autor skupia się na problemie automatycznego wykrycia obiektów pominiętych, takich jak kominy czy lukarny. Druga część rozprawy to próba udoskonalenia powstałych modeli budynków z wykorzystaniem hybrydowego modelu 3D, opartego na sparametryzowanych modelach wielościanów.

Inna metoda korekty grafów została zaproponowana w (Xiong *et al.*, 2013). Autorzy wyróżnili cztery rodzaje błędów: fałszywe węzły, pominięte węzły, fałszywe krawędzie i pominięte krawędzie. Na tej podstawie został opracowany słownik edycji grafów,

w którym dla określonych błędów zostały opracowane schematy korekcji, przebiegające w sposób automatyczny.

Zaletą metod parametrycznych jest pełna poprawność topologiczna oraz możliwość zastosowania w przypadku zbiorów o stosunkowo małej gęstości punktów. Podstawową wadą jest natomiast wynikająca z tego podejścia generalizacja, która bardzo często nie wystarcza do opisanie skomplikowanych konstrukcji budynków (Bujakiewicz i Preuss, 2009). Opracowane biblioteki zawierają modele uproszczone, w związku z tym nie są w stanie odtworzyć skomplikowanych brył, czy uwzględnić niewielkich elementów takich jak kominy i lukarny.

Metody model driven są stale modyfikowane i udoskonalane. Wprowadzane są nowe, bardziej uniwersalne biblioteki predefiniowanych obiektów podstawowych. Pojawiają się także nowe algorytmy mające na celu korektę grafów, aby uzyskać bardziej wiarygodne modele budynków.

Podsumowując, metody parametryczne pozwalają na rekonstrukcję budynków na poziomie LoD 2, co wydaje się być wystarczające dla celów infrastruktury informacji przestrzennej. Na terenach zabudowanych często występują budynki o prostych, typowych kształtach, które w zadowalający sposób można opisać z wykorzystaniem predefiniowanych bibliotek obiektów podstawowych.

5. REKOMENDACJE W ZAKRESIE POZYSKIWANIA MODELI 3D BUDYNKÓW W RAMACH PROJEKTÓW KRAJOWYCH

W sytuacji, gdy w Polsce konieczna jest pilna modernizacja takich baz danych jak ewidencja gruntów i budynków czy ewidencja uzbrojenia technicznego, czyli rejestrów georeferencyjnych powiązanych z procesami administracyjno-gospodarczymi, trudno jest uzasadniać konieczność opracowania budynków w wariancie 3D. Tym bardziej, że takiego wymogu nie stawia INSPIRE. Należy jednak spodziewać się, że wiele państw członkowskich podejmie zadanie opracowania krajowego modelu budynków 3D. Taką możliwość rozważa GUGiK planując projekt Polska 3D+. Dlatego warto już dzisiaj zastanowić się, jakimi metodami można uzyskać model 3D oraz jaki powinien być poziom jego szczegółowości przy założeniu, że projekt dotyczyłby całego terytorium państwa.

W Polsce wg danych GUS (2012) jest około 6.1 mln budynków, z czego mieszkalne stanowią 97.7%, mieszkalne jednorodzinne 90.3% a wielorodzinne 7% ogółu budynków. Tak duży odsetek budynków jednorodzinnych a niewielki wielorodzinnych z pewnością zaskakuje statystycznego Polaka mieszkającego w mieście, jak też fakt, że miasta zajmują tylko ok. 7% powierzchni kraju. Wśród budynków jednorodzinnych, zwłaszcza zbudowanych w latach 1945-1990, większość ma obrys prostokątny uzupełniony o wysunięte na zewnątrz wejście, też na planie prostokąta. Budynki nowsze mają bardziej złożone obrysy, co wiąże się też z wielopołaciowością dachów. Jednak odsetek budynków o prostym rzucie jest z pewnością bardzo wysoki, podobnie jak budynków, których dachy można zaliczyć do jednego z trzech typów: płaski, dwuspadowy i czterospadowy.

Autorzy wyrażają pogląd, że w ramach projektu Polska 3D+ powinien być opracowany najprostszy model, czyli LoD 1. Model taki będzie zawsze potrzebny przy wizualizacji drobnoskalowej, a ponadto jest wystarczający do wielu zastosowań analitycznych. Kolejnym etapem powinno być opracowanie na poziomie LoD 2, ale z ograniczeniem do miast i miejscowości, których zabudowa jest cenna kulturowo (obiekty wpisane do rejestru zabytków czy objęte ochroną konserwatorską). Nie ma racjonalnych przesłanek, aby rekomendować poziomy LoD 3 i LoD 4 w projekcie o zasięgu krajowym. Modelowanie na tych poziomach powinno być pozostawione do decyzji władz lokalnych. Taka strategia spowoduje, że modele LoD 2 i LoD 3 nie będą dostępne dla całego kraju. Jednak nie przekreśla to możliwości ich współużytkowania z modelem LoD 1, zarówno dla celów poglądowych, jak też dla celów analitycznych (np. analizy krajobrazu, oddziaływanie na środowisko, scenariusze reakcji na zagrożenia kryzysowe, klimat akustyczny).

W przypadku opracowania LoD 1 z przekonaniem można zalecać proste podejście o cechach *model driven* z wykorzystaniem danych ISOK i EGiB/BDOT10k. Dane o konturach budynków usprawniłyby proces modelowania, wskazując obszary występowania budynków. W tak zidentyfikowanych obszarach pozostawałoby określić reprezentatywną wysokość płaskiego dachu jako wybrany parametr statystyczny współrzędnej wysokościowej wyciętego fragmentu chmury punktów (ani specyfikacja standardu CityGML, ani specyfikacja INSPIRE w zakresie budynków nie precyzuje zasad pozycjonowania wysokości płaskiego dachu reprezentującego w LoD 1 dach wielopłaciowy).

Dla opracowania LoD 2 warto rekomendacji jest postępowanie stosujące w pierwszej kolejności metodę *model driven*, a w przypadku niepowodzenia - *data driven*. Krytycznym i koniecznym do rozwiązania problemem byłoby wypracowanie miary jakości dopasowania wzorcowych kształtów budynków pozwalającej zdecydować, czy konieczne jest zastosowanie bardziej złożonej metody nieparametrycznej. Dla obszarów miast gęsto zabudowanych można od razu zalecać podejście *data driven*. Rozważyć też należałoby opracowanie biblioteki wzorcowych budynków dostosowaną do regionalnych trendów architektonicznych, zarówno historycznych, jak i współczesnych.

Zarysowana koncepcja budowy modeli o szczegółowości LoD 1 i LoD 2 jest dobrze dopasowana do danych z lotniczego skaningu laserowego, jakie są lub wkrótce będą dla prawie całej Polski. Skaniny o gęstości 12 pkt/m² wykonywane w obszarach miast wystarczy dla opracowania LoD 2, a skaniny o gęstości 4 pkt/m² jest odpowiedni do modelowania LoD 1. Zalecanym źródłem obrysów budynków jest baza EGiB, ale w razie jej braku można wykorzystać budynki z BDOT10k. Pozyskiwanie informacji o wysokości budynku na podstawie liczby kondygnacji, co teoretycznie mogłoby być zastosowane przy opracowaniu LoD 1, prowadzi do wielu przekłamań, często większych od zalecanej dla LoD 1 dokładności wysokościowej 5 m.

6. PODSUMOWANIE

Budynki odgrywają szczególną rolę w życiu społeczno-gospodarczym, czego historycznym dowodem jest objęcie budynków państwowym systemem katastralnym. Zgodnie z przyjętym założeniem, artykuł przedstawia metodyczny aspekt opracowania

modelu 3D budynków na tle obowiązków Polski jako kraju członkowskiego UE. Scharakteryzowano dwie metody modelowania budynków, jakie od lat są rozwijane i testowane w wielu ośrodkach badawczych. Ugruntowano, wynikający z wcześniejszych badań Autorów pogląd, że dane zgromadzone w państwowym zasobie geodezyjnym i kartograficznym mogą być wykorzystane do opracowania modelu budynków 3D zgodnego z wymaganiami INSPIRE.

Opracowane do tej pory metody modelowania mają jeszcze sporo wad, wymagają dalszych prac badawczych i wdrożeniowych. Pomimo niedoskonałości metod warto podjąć trud opracowania krajowego modelu budynków 3D, choćby w najprostszej postaci LoD 1. Da to szansę sprawdzenia korzyści, jakie przyniosą takie dane w analizach przestrzennych wykonywanych w technice GIS. Jest jeszcze inna motywacja rozwoju 3D GIS. Od kilkunastu lat rozwija się pokrewne do GIS rozwiązanie, jakim jest Building Information Modeling - BIM (Laat i Berlo, 2011). Technika ta jest stosowana zarówno na etapie projektowania, realizacji jak i podczas eksploatacji budynków. Filozofia BIM jest zasadniczo różna od CityGML, model typu BIM jest skoncentrowany na informacji konstrukcyjno-budowlano-infrastrukturalnej a model typu GIS na wyglądzie obiektu. Współpraca pomiędzy 3D GIS a BIM nie tylko zintegruje działania różnych środowisk zawodowych, ale przyniesie wiele korzyści w zakresie zrównoważonego rozwoju.

Praca wykonana w ramach działalności statutowej AGH nr 11.11.150.959

7. LITERATURA

Ameri, B., Fritsch, D., 2000. Automatic 3D building reconstruction using plane-roof structures, *ASPRS, Washington DC*.

Borowiec N. 2013. Transformata Hougha jako narzędzie wspomagające wykrywanie dachów budynków. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 25, s. 45-54.

Brédif M., 2010. Building modeling: Topology-Aware Kinetic Fitting of Polyhedral Roofs and Automatic Roof Superstructure Reconstruction. Doctoral thesis. Télécom ParisTech, France.

Bujakiewicz A., Preuss R., 2009. Ocena możliwości automatycznej rekonstrukcji 3D modeli budynków z danych fotogrametrycznych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 19, s. 23-33.

Cisło-Lesicka U., 2013a. BDOT10k w postaci trójwymiarowej, Rola Bazy Danych Obiektów Topograficznych w tworzeniu infrastruktury informacji przestrzennej w Polsce (R. Olszewski, D. Gotlib [red.]), s. 249-253.

Cisło-Lesicka U., 2013b. Konwersja Bazy Danych Topograficznych do postaci 3D (monografia). Wydawnictwa AGH, Kraków, s. 79-101.

Durupt M., Taillandier F., 2006. Automatic building reconstruction from digital elevation model and cadastral maps: an operational approach. *IAPRS&SIS*, Vol.36 (Part 3/W24), s. 142-147.

ESRI, 1994. Arc/Info Data Management: concepts, data models, database design and storage. ESRI, Redlands.

Gaździcki J., 2009. Druga faza programu prac INSPIRE: stan w Europie i wyzwania dla Polski. *Roczniki Geomatyki*, Tom VII, z. 6; s. 61-72.

- GUS - Główny Urząd Statystyczny, 2012. Wyniki Narodowego Spisu Powszechnego Ludności i Mieszkań 2011. Warszawa, marzec 2012, s. 1-30,
http://stat.gov.pl/cps/rde/xbcr/gus/lu_nps2011_wyniki_nsp2011_22032012.pdf
- Jarząbek-Rychard M., 2012. Automatyczna budowa wektorowych modeli 3D budynków na podstawie danych lotniczego skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 24, s. 99-109.
- Kolbe T. H. & Gröger, G., 2003. Towards Unified 3D-City-Models. In: Proc. of. ISPRS Commission IV Joint Workshop on Challenges in Geospatial Analysis, Integration and Visualization II, September 8-9, Stuttgart, Germany.
- Kolbe T. H.; König, G.; Nagel, C. (Eds.) 2011: *Advances in 3D Geo-Information Sciences*, ISBN 978-3-642-12669-7 Series Editors: Cartwright, W., Gartner, G., Meng, L., Peterson, M.P., ISSN: 1863-2246.
- Kurczyński Z., Bakula K., 2013. Generowanie referencyjnego numerycznego modelu terenu o zasięgu krajowym w oparciu o lotnicze skanowanie laserowe w projekcie ISOK. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, wydanie specjalne - monografia „Geodezyjne Technologie Pomiarowe”, s. 59-68.
- Lafarge F., Descombes X., Zerubia J. Pierrot-Deseilligny M., 2010. Structural Approach for Building Reconstruction from a Single DSM. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Vol. 32, no. 1, s. 135-147.
- Laat R. de, Berlo, L. van, 2011. *Integration of BIM and GIS: The Development of the CityGML GeoBIM Extension*. In: Advances in 3D Geo-Information Sciences, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Springer, pp 211-225.
- Maas H.-G., Vosselman, G., 1999. Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 54, No. 2/3, s. 153-163.
- Milde J., Brenner, C., 2009. Graph-based modeling of building roofs. In: *Proceedings of the 12th AGILE Conference on GIScience*, Hannover, Germany (on CD-ROM).
- Nagel C, Stadler A, Kolbe T., 2009. Conceptual Requirements for the Automatic Reconstruction of Building Information Models from Uninterpreted 3D Models. *Academic Track of Geoweb 2009 Conference*, Vancouver.
- OGC (Open Geospatial Consortium), 2012. OpenGIS® City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard. <http://www.opengis.net/spec/citygml/2.0>.
- Oude Elberink S., Vosselman G., 2009. Building Reconstruction by Target Based Graph Matching on Incomplete Laser Data: Analysis and Limitations. *Sensors* 9(8), s. 6101-6118.
- Oude Elberink S., Vosselman G., 2011. Quality analysis on 3D building models reconstructed from airborne laser scanning data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 66, Issue 2, s. 157-165.
- Tarsha-Kurdi F., Landes, T., Grussenmeyer, P., 2007. Hough-transform and extended RANSAC algorithms for automatic detection of 3D building roof planes from Lidar data. *ISPRS Workshop on Laser Scanning and SilviLaser*, Espoo, September 12-14, Finland.
- Xiong B., Oude Elberink S., Vosselman G., 2013. Effects of Building Primitive Library and Automatic Correction of Roof Topology Graph. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-5/W2, s. 337-342.

**ANALYSIS OF USEFULNESS OF AIRBORNE LASER SCANNING FOR
PREPARATION OF 3D BUILDINGS MODEL CONSISTENT WITH INSPIRE
SPECIFICATION**

KEY WORDS: ALS, INSPIRE, 3D model , 3D GIS, buildings

Summary

The inspiration to undertake the subject was the announcement of preparations for project Poland 3D+. First the presentation of background analysis of modelling methods was sketched. Then the principles of buildings modelling, imposed by INSPIRE specification, were recalled. Next the conditions of conversion of 2D spatial database to 3D ones, on the basis of experience acquired thanks to the research project performed in AGH in the years 2009-2012, was discussed. The research indicated airborne scanning as the best data source but at the same time indicated that highly detailed models considered for large areas may turn out to be poorly efficient for the GIS technology. Then the systematization of modelling methods of airborne scanning, with emphasis on advantages and disadvantages of the approach model driven and data driven, was presented. The thesis is concluded with a suggestion of modelling strategy in the context of condition of geo-reference databases in Poland, prospects of their development and demand for spatial data from the social and economic point of view. A gradual solution was suggested, in which, firstly, attempts are made to apply the model driven method and in case of failure, the data driven method is applied, which enables modelling the buildings of complex shapes but does not guarantee full automation. Such a procedure, in the opinion of the authors, would be optimal at implementation of project Poland 3D+.

Dane autorów:

dr inż. Urszula Cisło-Lesicka
e-mail: cislo@agh.edu.pl
telefon: 12 6173993

prof. dr hab. inż. Krystian Pyka
e-mail: krisfoto@agh.edu.pl
telefon: 12 6174485

dr inż. Natalia Borowiec
e-mail: nboro@agh.edu.pl
telefon: 12 6172302

dr inż. Urszula Marmol
e-mail: entice@agh.edu.pl
telefon: 12 6172302

Przesłano 20.10.2014
Zaakceptowano 20.12.2014