

**POZYSKIWANIE INFORMACJI 3D O BUDYNKACH DLA POTRZEB
TRÓJWYMIAROWEJ WIELOROZDZIELCZEJ BAZY TOPOGRAFICZNEJ**

**GENERATION OF 3D BUILDINGS FOR THREE-DIMENSIONAL
MULTIRESOLUTION TOPOGRAPHIC DATABASE**

Urszula Cisło-Lesicka

Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska,
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: baza danych topograficznych, baza wielorozdzielcza, dane 3D, stereodigitalizacja, dane ewidencyjne, LIDAR

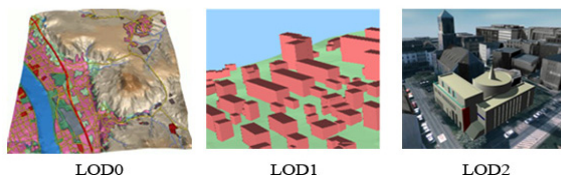
STRESZCZENIE: W ramach projektu „Konwersja obiektów Bazy Danych Topograficznych do postaci trójwymiarowej dla potrzeb dynamicznej geowizualizacji” (N N526 192537) opracowywane są zasady konwersji obiektów TBD do postaci 3D oraz sposobów ich dynamicznej geowizualizacji. Koncepcja Bazy Danych Topograficznych do postaci trójwymiarowej w postaci 3D (TBD 3D) zakłada przedstawianie budynków w trójwymiarowej postaci na dwóch poziomach szczegółowości – LOD (Level of Detail). W mniej szczegółowym LOD1 budynki prezentowane będą za pomocą zgeneralizowanego modelu blokowego z płaskimi dachami. Natomiast w bardziej szczegółowym LOD2 będą posiadały zróżnicowane kształty dachów. Dla budynków na poziomie LOD2 została zaproponowana wstępna generalizacja kształtu dachów do 7 głównych typów budynków. Stopień szczegółowości przedstawiania budynków na poszczególnych poziomach LOD determinuje sposób oraz źródło pozyskania informacji wysokościowej. W niniejszym artykule zostały przedstawione różne metody pozyskania informacji o budynkach w postaci 3D wykorzystujące dostępne dane pochodzące z ewidencji gruntów i budynków, stereodigitalizacji na zdjęciach lotniczych oraz danych otrzymanych z lotniczego skaningu laserowego. Badania zostały przeprowadzone na 3 różnych obszarach przedstawiających różne formy zabudowy: zwartą, luźną i wiejską. Został zaproponowany algorytm postępowania z wykorzystaniem funkcjonalności narzędzi do przetwarzania danych lidarowych, stereodigitalizacji na zdjęciach lotniczych oraz programów typu CAD. Następnie porównano wyniki uzyskane w trakcie opisanych w niniejszym artykule badań i stwierdzono, że metoda wykorzystująca dane z lotniczego skaningu laserowego jest najbardziej efektywna. Na koniec przedstawiono wnioski z analizy przydatności zastosowanych metod pozyskania danych w zależności od stopnia szczegółowości prezentowanych danych.

1. WPROWADZENIE

Koncepcja Bazy Danych Topograficznych w postaci 3D (TBD 3D) opracowywana w ramach projektu „Konwersja obiektów Bazy Danych Topograficznych do postaci trójwymiarowej dla potrzeb dynamicznej geowizualizacji” (N N526 192537), zakłada istnienie obiektów w trzech wymiarach na trzech poziomach szczegółowości (uogólnienia). W planowanym systemie TBD 3D przewiduje się wstępny podział obiektów na dwie

główne grupy. Pierwsza składa się z obiektów, które będą przedstawiane w swej rzeczywistej postaci lub za pomocą symboli 3D. Dla obiektów w postaci rzeczywistej (np. budynki) informacja o trzecim wymiarze będzie pozyskana z danych ewidencyjnych, stereodigitalizacji lub wykorzystując dane z lotniczego skaningu laserowego. Drugą grupę utworzą obiekty, które uzyskają trzeci wymiar w wyniku superpozycji danych dwuwymiarowych z numerycznym modelem rzeźby terenu, np. sieć dróg, kolei i cieków wodnych, kompleksy użytkowania terenu (Cisło, 2008).

Ponadto TBD 3D planowana jest jako wielorozdzielcza trójwymiarowa baza dla wybranych obiektów 3D tak, by możliwe było, w razie takiego życzenia użytkownika, pokazanie terenu i obiektów 3D, a w szczególności budynków, w różnym stopniu szczegółowości. Obiekty te będą zorganizowane w 3 poziomach szczegółowości – LOD (Level of Detail), wzorowanych na trzech najbardziej ogólnych poziomach obowiązujących w schemacie aplikacyjnym międzynarodowego standardu Geography Markup Language (GML), będącego standardem OpenGIS® dedykowanym modelowaniu 3D miasta – CityGML (OGC, 2008) (Rysunek 1).



Rys. 1. Trzy najbardziej ogólne poziomy szczegółowości zdefiniowane w CityGML (OGC, 2008)

1.1. Szczegółowość przedstawiania budynków w TBD 3D

Budynki w TBD 3D będą przedstawiane na dwóch najbardziej szczegółowych poziomach:

- LOD1 (model blokowy): budynki przedstawione są jako proste bloki ze zgeneralizowaną geometrią i płaskim dachem,
- LOD2 (model geometryczny): budynki mają zaznaczone kształt dachów.

Reguły pozyskania trójwymiarowej informacji o budynkach oparto na standardzie CityGML (Tabela 1), gdzie w mniej szczegółowym poziomie LOD1 budynki przedstawiane są w sposób zgeneralizowany za pomocą modelu blokowego, a wszystkie szczegóły o wymiarach poniżej 6×6 m oraz wysokości 3 m są pomijane. Na poziomie tym wszystkie budynki pozyskiwane są z dokładnością sytuacyjną i wysokościową ± 5 m, a ich dachy są płaskie. Bardziej szczegółowy LOD2 zawiera budynki ze zgeneralizowanymi detalami sytuacyjnymi poniżej 4 m i wysokościowymi poniżej 2 m, a dokładność pozyskania ich współrzędnych (X, Y, Z) to ± 2 m. Przedstawiona jest struktura i typ dachu, ale nie są uwzględnione dodatkowe zewnętrzne elementy budynku jak np. kominy, anteny, balkony, itp.

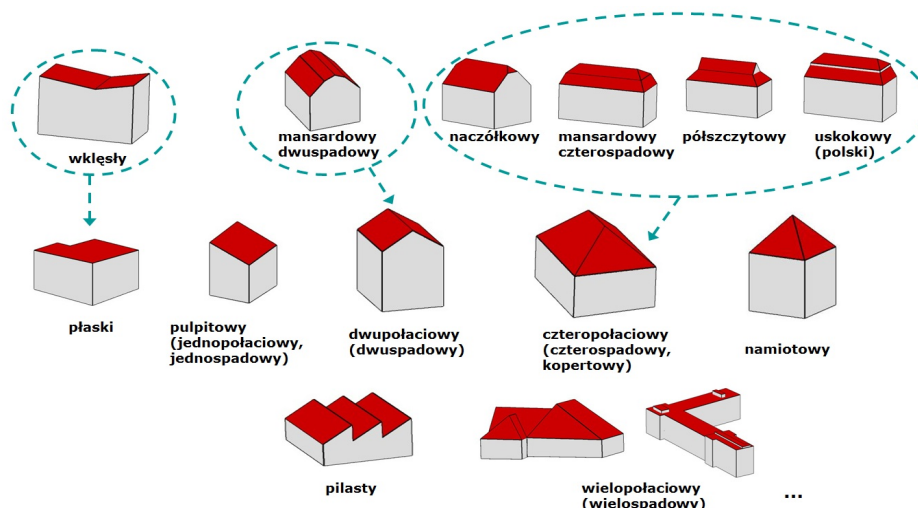
Zaproponowane w CityGML zasady generalizacji budynków zostały uzupełnione o reguły pozyskiwania danych wektorowej bazy danych topograficznych określonych w załączniku 1 do „Wytycznych technicznych Baza Danych Topograficznych (TBD)” (GUGiK, 2008). Zgodnie z tymi wytycznymi pomijane mogą być małe budynki niemieszkalne położone w bliskim sąsiedztwie innych zabudowań oraz na obszarach ogródków

działkowych, czy placach budowy, gdy ich powierzchnia jest mniejsza niż 40 m². Ponadto według wytycznych TBD występy i załamania ścian budynków zaznacza się, jeśli są one większe od 4 m, co odpowiada generalizacji na poziomie LOD2.

Tab. 1. Charakterystyka poziomów szczegółowości przedstawiania budynków w TBD 3D

	LOD0	LOD1	LOD2
Opis skali modelu	ogólna prezentacja modelu regionu	miasto, region	dzielnica, obszar projektu
Bezwzględna dokładność punktu 3D (XY/Z)	mniejsza niż LOD1	5/5 m	2/2 m
Generalizacja	maksymalna generalizacja (kompleksy pokrycia terenu)	zgeneralizowane obiekty > 6*6 m/3m	zgeneralizowane obiekty > 4*4m/2m
Dodatkowe instalacje budynku	brak	brak	brak
Forma i struktura dachów	n.d.	płaski	zgeneralizowane połączenia dachowe
Zwisające części dachu	n.d.	n.d.	n.d.

W ramach generalizacji połączeń dachowych na poziomie LOD2 zaproponowano wstępny podział na 7 typów budynków przedstawianych w TBD 3D (Rysunek 2): budynki o dachu płaskim, jednopołaciowym (pulpitowym), dwupołaciowym, czteropołaciowym, namiotowym, pilastym (charakterystycznym dla terenów przemysłowych) oraz wielopołaciowym przyjmującym różne formy. Pozostałe typy budynków o bardziej złożonej strukturze dachów proponuje się generalizować w następujący sposób: budynek o dachu wklęsłym do budynku o dachu płaskim, budynek z dachem mansardowym dwuspadowym do budynku o dachu dwupołaciowym, a budynki o dachach naczółkowym, mansardowym czterospadowym, półszczytowym i uskokowym do budynku z dachem czteropołaciowym.



Rys. 2. Wstępna propozycja generalizacji budynków w TBD 3D na poziomie LOD2

1.2. Sposoby pozyskiwania modeli budynków 3D na świecie

Istnieje wiele sposobów i źródeł pozyskania informacji 3D o budynkach, które wykorzystywane są w zależności zastosowania pozyskanego modelu 3D, a co za tym idzie od stopnia szczegółowości modelowanych budynków. Najprostszym sposobem na pozyskanie modelu blokowego budynków (z płaskimi dachami) jest wykorzystanie danych wektorowych pochodzących z dostępnych map numerycznych oraz baz danych katastralnych, z których możemy uzyskać informację o ilości kondygnacji budynków (Różycki, 2007). Zbudowany tak model jest prymitywny i mało dokładny, ale stosując się do przyjętych zasad pozyskiwania informacji o ilości kondygnacji (GUGiK, 2008) oraz zakładając, że średnia wysokość kondygnacji to 2.5 m, wydaje się, że jest to akceptowalna metoda na pozyskanie informacji 3D dla budynków na poziomie szczegółowości LOD1 (dokładność wysokościowa punktów ± 3 m). Metoda ta sprawdza się głównie na terenach o zabudowie wysokiej, kiedy nie ma trudności w interpretacji ilości kondygnacji. Problemy z interpretacją mogą pojawić się w przypadku budynków niskich charakterystycznych dla zabudowy jednorodzinnej i wiejskiej. Dla takich terenów bardziej zasadne i dokładne wydaje się wykorzystanie zaawansowanych technologii do pozyskiwania informacji wysokościowej o zabudowie, jak np. danych pochodzących z lotniczego skaningu laserowego (*LIDAR – Light Detection And Ranging*). Dane lidarowe mogą posłużyć do szybkiego, automatycznego generowania płaskich dachów na maksymalnej wysokości obliczonej z punktów sklasyfikowanych jako budynki.

Do pozyskiwania informacji 3D o budynkach na poziomie szczegółowości LOD2, kiedy przedstawia się już strukturę i rodzaj dachów, zastosowanie mają głównie dwie metody. Pierwsza z nich wykorzystuje dane ze skaningu laserowego, druga korzysta ze stereopar zdjęć lotniczych lub satelitarnych. Oba źródła danych dają wystarczającą dokładność pozyskiwania informacji 3D o budynkach na poziomie LOD2. Istnieją różne automatyczne i półautomatyczne sposoby wykorzystania lotniczego skaningu laserowego. Od przetwarzania surowej chmury punktów (Forlani *et al.*, 2006), połączenia modeli pozyskanych z pierwszego i ostatniego odbicia wiązki laserowej, co znacząco wpływa na dokładność modelu (Vögtle *et al.*, 2005), czy wykorzystania regularnej i nieregularnej teselacji (Borowiec 2008), po integrację ich z danymi pochodzącymi z innych źródeł wektorowych map 2D (Haala, 1998), czy zdjęć lotniczych (Hongjian, *et al.*, 2006). Nadal niemniej popularną metodą jest stereodigitalizacja na zdjęciach lotniczych lub satelitarnych, czy automatyczna rekonstrukcja modeli 3D budynków wykorzystująca jedynie zdjęcia (Kada, 2003) lub wspierająca się dodatkowo danymi wektorowymi (Suveg *et al.*, 2004). Dokładność modeli wysokościowych budynków opartych na stereo parach zdjęć lotniczych w skali 1:5 000 wynosi około 20 cm, a w przypadku zdjęć satelitarnych z wysokorozdzielczych systemów VHRS wynosi około 1÷2 m (Ulm, 2003). Natomiast dokładność metod półautomatycznych bazujących na danych lidarowych wynoszą 0.3÷0.5 m w płaszczyźnie pionowej (Ulm, 2003). Przy czym dokładności te zależne są, w przypadku zdjęć lotniczych i satelitarnych, od ich skali i rozdzielczości, a w przypadku danych z lotniczego skaningu laserowego od gęstości punktów.

Oczywiście budynki 3D na poziomie LOD2 mogą być pozyskiwane technologią naziemną zarówno przy użyciu laserów naziemnych (Böhm, 2009) jak i zdjęć naziemnych. Przy czym w przypadku techniki skaningu laserowego można też wykorzystać metodę mobilną (*mobile laser scanning*) (Haala, 2008). Jednak czasochłonność i zbyt wysoka

dokładność pozyskiwania danych metodami naziemnymi powoduje, iż są one bardziej użyteczne do pozyskiwania pojedynczych modeli architektonicznych lub do projektów obejmujących niewielkie regiony. Dla potrzeb TBD 3D technologie naziemne są nieekonomiczne.

Ciekawą propozycją jest również technologia Pictometry® polegająca na wykonywaniu 4 zdjęć ukośnych ($\sim 45^\circ$) i jednego zdjęcia nadirowego z niskiego pułapu lotniczego. Na tak pozyskanych zdjęciach wykonywane są pomiary współrzędnych punktów, wysokości, poziomych odległości, kątów, czy powierzchni (Madej, 2007). Technologia ta opatentowana przez amerykańską firmę Pictometry w specjalnie dedykowanym oprogramowaniu umożliwia m.in. opracowanie modelu 3D z fotograficznym przedstawieniem elewacji budynków na poziomie dokładności 2÷3 m lub dokładniej, co odpowiada wymogom LOD2 (Drawberry, 2007). Niestety na razie norweska firma Blom, będąca głównym przedstawicielem firmy Pictometry w Europie, nie posiada danych dla obszaru Polski (BlomPictometry, 2010).

2. POZYSKIWANIE INFORMACJI 3D O BUDYNKACH DLA POTRZEB TBD 3D

Na wstępie badań przedstawionych w tym artykule wykonano analizę wymagań dokładnościowych dla poszczególnych poziomów szczegółowości (LOD1 i LOD2) przedstawionych w podrozdziale 1.1 oraz istniejących technologii (podrozdział 1.2). Następnie uwzględniając dostępność odpowiednich danych, zdecydowano się na zbadanie możliwości wykorzystania danych z lotniczego skaningu laserowego oraz stereodigitalizacji na zdjęciach lotniczych. Wybrano 3 pola testowe przedstawiające różne formy i zagęszczenie zabudowy na terenie miasta Krakowa. Pierwsze pole testowe obrazowało zwartą zabudowę w centrum Krakowa, gdzie znajdują się głównie przylegające do siebie 3÷5 kondygnacyjne kamienice tworzące zwarte kwartały. Pole to obejmowało obszar 3 ha, na którym znajduje się 25 budynków. Drugie pole testowe przedstawiało luźną zabudowę, czyli wolnostojące budynki o zróżnicowanej wysokości. Teren obejmował powierzchnię 23 ha i 57 budynków. Trzecie pole testowe o powierzchni 6 ha przedstawiało 60 niskich budynków o charakterze wiejskiej, jednorodzinnej zabudowy.

Do analizy wybranych metod pozyskania budynków 3D wykorzystano następujące dane:

- dwuwymiarowe przyziemia budynków pozyskane z ewidencji gruntów i budynków,
- skalibrowane dane z lotniczego skaningu laserowego,
- zdjęcia lotnicze.

Dane ewidencyjne zakupione w Urzędzie Miasta Krakowa pochodzą z różnych okresów i były pozyskane dwoma sposobami: z pomiarów bezpośrednich (dokładność kilku cm) i z wektoryzacji mapy zasadniczej w skali 1:500 (dokładność kilkunastu cm). Przyziemia budynków zostały zgeneralizowane do poziomu odpowiadającego wymogom TBD. Dane z lotniczego skaningu laserowego udostępnione przez Biuro Planowania Przestrzennego Urzędu Miasta Krakowa pochodzą z 2006 roku i zostały pozyskane systemem pomiarowym Fli-Map 400 z pułapu lotu około 350 m. Gęstość chmury punktów zawiera się w przedziale 11÷30 punktów na m^2 , a dokładność sytuacyjna wynosi 20 cm i wysokościowa 10 cm. Natomiast zdjęcia lotnicze udostępnione przez MGGP Areo wykonane zostały w 2009 roku kamerą cyfrową DMC01 z pikselem obrazowym $12\mu m$ i stałą kamery $c_k=120$ mm oraz pikselem terenowym 10 cm. Dokładność pomiaru sytuacyjnego na zdjęciach wynosiła 5 cm, a wysokościowa 16 cm.

2.1. Modelowanie budynków 3D na podstawie danych z lotniczego skaningu laserowego

Modelowanie budynków 3D z wykorzystaniem danych z lotniczego skaningu laserowego wykonano w pakiecie oprogramowania firmy Terrasolid (TerraScan, TerraModeler, TerraPhoto) dla każdego z trzech pól testowych, tym samym schematem postępowania. W pierwszym etapie generowania budynków 3D wykonano wstępną klasyfikację skalibrowanej chmury punktów. Wydzielono wówczas punkty leżące na powierzchni terenu, pod powierzchnią terenu (*low points*) oraz niskiej, średniej i wysokiej roślinności. Dokonano również wstępnej klasyfikacji budynków oraz, w miejscu Występowania budynków, sztucznego zagęszczenia punktów należących do kategorii powierzchni terenu. Etap ten wykonano automatycznie przy użyciu algorytmów wbudowanych w program TerraScan, by później poddać go kontroli i ręcznym poprawkom źle sklasyfikowanych punktów. Następnie wykorzystując zgeneralizowane przyziemia budynków dokonano właściwej klasyfikacji budynków z 0.5 m buforem wokół przyziemi oraz wydzielono dodatkowe klasy elementów budynków (ściany, dach, elementy na dachu). Tak sklasyfikowane budynki poddano kontroli poprawności klasyfikacji punktów. W przypadku pozyskiwania budynków na poziomie LOD2 w kolejnym etapie wykorzystano nową funkcjonalność programu TerraScan umożliwiającą automatyczne generowanie budynków (*Building Vectorization*). Następnie tak stworzone budynki poddano półautomatycznej kontroli (*Check Building Models*) pod kątem poprawności odwzorowania struktury dachów i tworzenia kalenic w miejscach przecinania się połączeń dachowych. W etapie tym dokonywano również korekty kształtu samego obrysu oraz ewentualnej generalizacji detali. Wspierano się przy tym zgeneralizowanymi danymi ewidencyjnymi. W przypadkach gdy półautomatyczna korekta nie dawała zadowalających efektów, modelowanie budynków 3D wykonywano przy użyciu funkcji *Construct Planar Building*, która umożliwia półautomatyczne modelowanie płaszczyzn dachów i bardziej szczegółową klasyfikację punktów należących do wybranych połączeń dachowych. Następnie na tej bardziej szczegółowo sklasyfikowanej chmurze punktów modelowano automatycznie cały budynek. W skrajnych przypadkach, przy budynkach wielopołaciowych o skomplikowanej strukturze, konieczna była również ręczna wektoryzacja na chmurze punktów.

Dane z lotniczego skaningu laserowego wykorzystano także do pozyskania budynków z płaskimi dachami dla poziomu szczegółowości LOD1. Sklasyfikowana kategoria chmury punktów – „dachy” została wykorzystana do automatycznego przypisania maksymalnej wysokości punktów z tej klasy poszczególnym przyziemiom budynków (*Set Polygon Elevation*). Wysokości zostały przyjęte indywidualnie dla każdego budynku. Następnie na podstawie tak uzyskanych płaszczyzn dachów, wykorzystując funkcjonalność programu MicroStation, wymodelowano budynki 3D.

2.2. Modelowanie budynków 3D na podstawie zdjęć lotniczych

Schemat postępowania w metodzie wykorzystującej stereodigitalizację na zdjęciach lotniczych do modelowania budynków 3D zależał od użytego oprogramowania. W metodzie tej dla każdego pola testowego wykonano stereodigitalizację na innej stacji fotogrametrycznej w celu sprawdzenia ich przydatności do pozyskiwania informacji 3D o budynkach. Pierwsze pole testowe przedstawiające zwartą zabudowę pomierzono na stacji Dephos

(Botko, 2008), drugie pole testowe z luźną zabudową zwektoryzowano na stacji VSD, a trzeci obszar (wiejska zabudowa) na stacji Socet Set.

Algorytm postępowania dla stacji Dephos i VSD był taki sam zarówno dla pozyskania budynków na poziomie LOD1, jak i LOD2 i zaczynał się od zestrojenia stereogramu zdjęć. Następnie w przypadku pozyskiwania budynków z płaskimi dachami (LOD1) zwektoryzowano obrysy budynków na maksymalnej pomierzonej wysokości budynku. Następnie dokonywana była kontrola graficzna kształtu budynku, do czego wykorzystano przyziemia 2D, by na końcu wymodelować budynki z płaskimi dachami wykorzystując funkcjonalność programu Microstation. Natomiast podczas pozyskiwania budynków 3D dla poziomu LOD2 po zestrojeniu stereogramu wykonywano stereodigitalizację połaci dachowych. Pomiary te podlegały następującym zasadom:

- kształt dachów został zgeneralizowany do zasadniczych elementów z wyróżnieniem głównych połaci dachowych;
- każda połać dachowa wyodrębniona została osobnym zamkniętym wielokątem (*shape*) przy zachowaniu warunku ich planarności oraz wzajemnego do siebie przystawiania;
- wektoryzacji nie podlegają kominy, okna połaciowe, instalacje anten oraz agregaty klimatyzatorów zainstalowane na dachach;
- wektoryzacji podlegają tylko te elementy, których długość i szerokość przekracza 4 m, a wysokość 2 m.

W kolejnym etapie wykonywano kontrolę graficzną kształtów obrysów budynków, do której wykorzystano przyziemia 2D pochodzące z ewidencji gruntów i budynków oraz kontrolę topologiczną zwektoryzowanych płaszczyzn dachowych, którą wykonano przy użyciu programu MicroStation wraz z aplikacją 3DXM. Ostatecznym etapem tej części badań było modelowanie budynków 3D na podstawie zdigitalizowanych dachów, do czego wykorzystano funkcjonalność oprogramowania MicroStation.

W przypadku zastosowania oprogramowania Socet Set schemat postępowania rozpoczął się, tak jak w przypadku poprzednich stacji fotogrametrycznych, od strojenia stereogramu zdjęć. Następnie konieczna była ekstrakcja numerycznego modelu terenu (*DTM – Digital Terrain Model*) wraz z jego kontrolą. W kolejnym etapie, wykorzystując możliwości Socet Set do półautomatycznego generowania budynków 3D, pozyskiwano trójwymiarowe modele budynków. Budynki z płaskim dachem (poziom LOD1) zostały pozyskane półautomatyczną metodą (*Flat Roof*) polegającą na zwektoryzowaniu obrysu na maksymalnej wysokości budynku, na podstawie którego program następnie automatycznie modelował ściany wykorzystując znajomość DTM. Do pozyskania budynków płaskich, jednopłaciowych, dwu- i czteropłaciowych na poziomie LOD2 również wykorzystano opcję półautomatycznego pomiaru (*Flat Roof, Peaked Roof, Gabled Roof*) polegającego na trójwymiarowej wektoryzacji obrysu budynku na wysokości okapu oraz wektoryzacji 3D głównej kalenicy. Następnie program automatycznie generował ściany budynków. W przypadku budynków wielopłaszczyznowych konieczna była ręczna stereodigitalizacja połaci dachowych, a kolejne etapy ich modelowania przebiegały jak w przypadku pomiaru na stacji Dephos i VSD.

3. UZYSKANE WYNIKI I WNIOSKI

Porównując wysokości budynków uzyskanych z danych lidarowych i stereodigitalizacji na zdjęciach lotniczych (Tabela 2) uzyskano maksymalne różnice wysokości budynków dla poziomu LOD1 od 1.68 m dla wiejskiej zabudowy do 4.19 m dla luźnej zabudowy, a dla poziomu LOD2 od 1.00 m do prawie 3.94 m. Maksymalny błąd średniokwadratowy dla poziomu LOD1 wyniósł 1.19 m, a dla LOD2 0.50 m. W obu poziomach najmniej dokładne wyniki uzyskano dla luźnej zabudowy, na co miał wpływ różny stopień aktualności danych na tym terenie.

Tab. 2. Dokładność wymodelowanych budynków 3D

	LOD1 [m]			LOD2 [m]		
	Zwarta zabudowa	Luźna zabudowa	Wiejska zabudowa	Zwarta zabudowa	Luźna zabudowa	Wiejska zabudowa
Maksymalna różnica wysokości budynków z obu metod	2.05	4.19	1.68	1.88	3.94	1.00
Minimalna różnica wysokości budynków z obu metod	0.21	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01
Błąd średniokwadratowy (MSE)	0.54	1.19	0.87	0.17	0.50	0.30
Ilość budynków, dla których różnica wysokości nie mieści się w przedziale ufności 95%	1 (4%)	1 (2%)	0 (0%)	3 (12%)	4 (7%)	0 (0%)

Następnie porównano czasochłonność metody modelowania budynków 3D z wykorzystaniem danych z lotniczego skaningu lotniczego z metodą wykorzystującą stereodigitalizację na zdjęciach lotniczych (Tabela 3), z których wynika, że zdecydowanie mniej czasu potrzebne jest na wymodelowanie budynków 3D pierwszą metodą wykorzystującą dane z lotniczego skaningu laserowego. Szczególnie dotyczy to pozyskiwania budynków na poziomie LOD2. W przypadku stereodigitalizacji konkurencyjny może być jedynie Socet Set z możliwością półautomatycznego generowania budynków.

Tab. 3. Czasochłonność wymodelowania budynków 3D

	Zwarta zabudowa		Luźna zabudowa		Wiejska zabudowa	
	LOD1	LOD2	LOD1	LOD2	LOD1	LOD2
Modelowanie budynków 3D z wykorzystaniem danych lidarowych						
Czas przygotowań (klasyfikacja chmury punktów)	1 h		2 h		1.5 h	
Modelowanie budynków 3D	15 min.	4 h	30 min.	6 h	30 min.	10 h
Całkowity czas	1.25 h	5 h	2.5 h	8 h	2 h	11.5 h
Modelowanie budynków 3D na podstawie zdjęć lotniczych						
Czas przygotowań (strojenie stereogramu)	1 h		1 h		2 h (ekstrakcja DTM)	
Stereodigitalizacja	30 min.	3 h	1 h	5 h	1 h	10 h
Modelowanie budynków 3D	30 min.	12 h	30 min.	17 h		
Całkowity czas	2 h	16 h	2.5 h	23 h	3 h	12 h

Do krótszego czasu modelowania budynków 3D na poziomie LOD2 przy wykorzystaniu danych lidarowych przyczyniła się głównie automatyzacja, dzięki której pozyskano bez konieczności wprowadzania poprawek od 32% budynków dla zwartej zabudowy do aż 57% budynków dla wiejskiej zabudowy (Tabela 4). Przy czym półautomatycznego modelowania lub ręcznej wektoryzacji na chmurze punktów wymagało jedynie od 6 do 15% budynków w zależności od rodzaju zabudowy. Natomiast w metodzie wykorzystującej stereodigitalizację na zdjęciach lotniczych w przypadku stacji Dephos i VSD wszystkie

budynki należało zwektoryzować ręcznie, a możliwość półautomatycznego generowanie budynków 3D w stacji Socet Set obniżyła tą ilość do 30% budynków. Najlepsze wyniki przy generowaniu budynków 3D z danych lidarowych osiągnięto dla zabudowy wiejskiej.

Tab. 4. Charakterystyka pomiaru budynków 3D w metodzie wykorzystujące dane lidarowe i stereodigitalizację na zdjęciach lotniczych

Modelowanie budynków 3D z wykorzystaniem danych lidarowych	LOD2		
	Zwarta zabudowa	Luźna zabudowa	Wiejska zabudowa
Ilość budynków pozyskanych automatycznie bez konieczności poprawek	32%	50%	57%
Ilość budynków wymagających poprawek (Check Building Model)	56%	35%	40%
Ilość budynków wymagających generalizacji	16%	16%	18%
Ilość budynków wymagających półautomatycznego modelowania (Construct Planar Building)	4%	4%	8%
Ilość budynków wymagających ręcznej wektoryzacji na chmurze punktów	8%	2%	7%
Ilość budynków, których kształt w 100% odpowiada pomiarowi stereo	52%	65%	88%
Modelowanie budynków 3D na podstawie zdjęć lotniczych	LOD2		
	Zwarta zabudowa	Luźna zabudowa	Wiejska zabudowa
Ilość budynków wymagających ręcznej wektoryzacji	100% (Dephos)	100% (VSD)	30% (Socet Set)

Podsumowując przedstawione w niniejszym artykule wyniki badań stwierdzono, że zarówno metoda wykorzystująca dane z lotniczego skaningu laserowego, jak i metoda wykorzystująca stereodigitalizację na zdjęciach lotniczych zapewnia pozyskanie modeli 3D budynków z założoną dokładnością dla poziomu LOD1 (± 5 m) i poziomu LOD2 (± 2 m). W obu metodach użycie dwuwymiarowych danych ewidencyjnych podwyższyło dokładność sytuacyjną wygenerowanych budynków 3D. Przy czym w obu metodach była konieczna generalizacja szczegółów budynków oraz struktury połączeń dachowych do przyjętych typów dachów. Metoda wykorzystująca dane lidarowe daje wystarczająco dokładne (dla poziomu LOD1 i LOD2) modele 3D budynków, jest mniej czasochłonna i relatywnie tańsza, a przez to bardziej efektywna. Do tego wniosku przyczyniła się przede wszystkim automatyzacja modelowania budynków 3D z chmury punktów, ale trzeba pamiętać, że nie jest jeszcze ona doskonała i przy budynkach o bardziej skomplikowanej strukturze konieczna jest półautomatyczna lub nawet ręczna wektoryzacja. Natomiast metoda stereodigitalizacji daje bardziej dokładne modele 3D budynków, ale jest bardziej czasochłonna i mniej ekonomiczna. Należy jednak zaznaczyć, że dokładność odwzorowania budynków (bez uwzględnienia generalizacji połączeń dachowych) ze stereodigitalizacji jest na tyle wysoka, że bardziej zasadna wydaje się przy pozyskiwaniu rzeczywistych modeli architektonicznych budynków LOD3 (OGC, 2008). W przypadku danych lidarowych dokładność pozyskania modelu budynków jest wystarczająca dla poziomu LOD2 nawet dla zwartej, czy jednorodzinnej zabudowy. Oczywiście zarówno przy modelowaniu budynków z danych lidarowych jak i stereodigitalizacji istotnym czynnikiem jest czynnik ludzki, doświadczenie obserwatora. Jednak obróbka chmury punktów z lotniczego skaningu laserowego nie wymaga, aż tak dużego doświadczenia, jak w przypadku wykonywania stereodigitalizacji na stereogramach zdjęć, która zależna jest od zdolności stereoskopowego widzenia obserwatora. Obie metody mają swoje wady i zalety, aczkolwiek skaningu

laserowy wypada bardziej korzystnie niż fotogrametria cyfrowa w przypadku pozyskiwania trójwymiarowych budynków dla potrzeb TBD 3D na poziomie szczegółowości LOD1 i LOD2.

4. LITERATURA

- Blompictometry, 2010: <http://www.blompictometry.com>
- Böhm J., 2009. Terrestrial LIDAR in urban data acquisition. *Photogrammetric Week 2009*, Wichmann Verlag, Heidelberg, s. 169–178.
- 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. 37, Part B6b*. s. 125–132.
- Botko K., 2008. Zasady pomiaru fotogrametrycznego dla potrzeb tworzenia modeli 3D. Praca magisterska realizowana w Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.
- Cisło U., 2008. Zarys koncepcji trójwymiarowej wielorozdzielczej bazy topograficznej. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 18a, s. 49–57.
- Drawberry, 2007: Report of Horizontal and Vertical Accuracy Testing Pictometry Airborne Oblique Imagery. <http://www.drawberry.com>
- Forlani G., Nardinocchi C., Scaioni M., Zingaretti P., 2006. Complete classification of raw LIDAR data and 3D reconstruction of buildings. *Pattern Analysis & Applications*, Vol. 8, s. 357–374.
- Główny Urząd Geodezji i Kartografii, 2008. Wytyczne techniczne Baza Danych Topograficznych (TBD) część 2 „Wytyczne pozyskiwania danych wektorowej TBD”. Warszawa.
- Haala N., Peter M., Kremer J., Hunter G., 2008. Mobile LIDAR mapping for 3D point cloud collection in urban areas. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 37, Part B5, Commission V, s. 1119–1130.
- Haala N., Brenner C., Anders K-H., 1998. 3D urban GIS from Laser altimeter and 2D map data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol.32, Part 3/1, s.339–346.
- Hongjian Y., Shiqiang Z., 2006. 3D building reconstruction from aerial CCD image and sparse laser sample data. *Optics and Lasers in Engineering* Vol.44 , s. 555–566.
- Kada M., 2003. 3D Building Generalisation and Visualisation. *Proceedings of Photogrammetric Week 2003*, Stuttgart, s. 29–38.
- Madej M., 2007. Pictometry® – a new perspective on aerial image products. *Roczniki Geomatyki*, Tom V, Zeszyt 3, s. 81–86.
- Open Geospatial Consortium, 2008. OpenGIS® City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard.
- Różycki S., 2007. Trójwymiarowe modele miast – tworzenie i zastosowania. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 17b, s. 709–716.
- Suveg I., Vosselman G., 2004. Reconstruction of 3D building models from aerial images and maps. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol.58, s. 202– 224.
- UlmK., 2003. Improved 3D city modeling with CyberCity-Modeler. Using aerial, satellite imagery and laser scanner data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 34-5/W10.
- Vogtle T., Steinle E., 2005. Fusion of 3D building models derived from first and last pulse laserscanning data. *Information Fusion* Vol.6 , s. 275–281.

**GENERATION OF 3D BUILDINGS FOR THREE-DIMENSIONAL
MULTIRESOLUTION TOPOGRAPHIC DATABASE**

KEY WORDS: topographic database, multiresolution database, 3D data, stereodigitalization, cadastral data, LIDAR

SUMMARY: The concept of three-dimensional multiresolution topographic database (TBD 3D) assumes that all features in TBD 3D exist in three dimensions on three different Levels of Detail (LOD). 3D buildings are represented in two most detailed levels. A building in LOD1 is represented by a block model with a flat roof. In LOD2 the building has differentiated roof structures. For buildings in LOD2 a preliminary generalization of the roof shape to 7 main types was proposed. The way of gaining and the type of data acquisition of the height information for 3D buildings are determined by the level of details. In this article are presented different methods of gaining 3D building models and an algorithm procedure. For modeling 3D buildings the author used 2D cadastral data, stereodigitizing on aerial images and LIDAR data. Research was conducted on 3 different test fields that represented various forms of buildings: compact, loose and rural. Next, a comparison and usefulness of those methods for three-dimensional multiresolution topographic database are presented. It was found that the method using data from airborne laser scanning is most effective for modeling 3D buildings. At the end of this article the conclusions from the analysis of suitability of the described methods, depending on the level of detail, are presented.

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