

WYKRYWANIE BUDYNKÓW NA PODSTAWIE LOTNICZEGO SKANOWANIA LASEROWEGO¹

DETECTION OF BUILDINGS BASED ON AIRBORNE LASER SCANNING DATA

Małgorzata Bucior¹, Natalia Borowiec¹, Ireneusz Jędrzychowski²,
Krystian Pyka¹

¹Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej, Akademia Górniczo-Hutnicza

²Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński

Słowa kluczowe: laser, skanowanie, wykrywanie budynków, modelowanie budynków
Keywords: laser, scanning, building detection, building modeling

Wprowadzenie

Lotniczy skanowanie laserowe jest jedną z najszybciej rozwijających się technik zdalnego pozyskiwania danych. Z punktu widzenia klasyfikacji teledetekcyjnych metod zbierania informacji o środowisku jest to technika aktywna – wysyłane i odbierane są impulsy światła laserowego, ale wynikiem nie jest obraz a zbiór współrzędnych XYZ wszystkich tych *punktów*, które odbiły padające światło. W literaturze technika ta jest często określana akronimem LIDAR (ang. *Light Detection And Ranging*). Należy jednak zauważyć, że jest to pewne uproszczenie, ten sam akronim oznacza bowiem także metodę lub urządzenie do sondowania atmosfery w celu wykrywania i badania zanieczyszczeń (Dworak, 1990). *Lidary atmosferyczne* sondują atmosferę (najczęściej ze stanowisk naziemnych) w określonym kierunku, nie występuje w nich element skanowania. W niniejszym artykule jako skrótowe określenie lotniczego skanowania laserowego będzie używany akronim ALS (ang. *Airborne Laser Scanning*) (Baltsavias, 1999a,b).

Wynikiem skanowania laserowego jest zbiór punktów o znanych współrzędnych XYZ nazywany obrazowo „chmurą punktów”. Zbiór ten wymaga podziału na podzbiory odpowiadające różnym klasom obiektów, a celem końcowym jest modelowanie określonych obiektów. Typowym zadaniem jest wyselekcjonowanie punktów, które leżą na powierzchni terenu, a w konsekwencji tworzenie numerycznego modelu terenu (ang. *DTM – Digital Terrain Model*). Do tego celu opracowano wiele algorytmów filtrujących dane (Axelsson, 1999; Borkowski, 2002; Sohn, Dowman, 2002; Hyyppä i in., 2002; Marmol, 2003; Borkowski, 2005; Marmol, 2005). Ale specyfika danych ALS predysponuje je przede wszystkim do tworzenia numerycznego modelu pokrycia terenu (ang. *DSM – Digital Surface Model*).

¹ Praca wykonana w ramach badań statutowych AGH nr.11.11.150.459.

Skanowanie laserowe jako technika pozyskiwania danych 3D znakomicie wpisuje się w tendencję rozwoju GIS w kierunku tzw. 3D GIS, czyli takiego w którym geometria obiektów jest złożona z elementów wyznaczonych przez zbiory współrzędnych XYZ (w tradycyjnym GIS obiekty są opisane przez zbiory XY, współrzędna Z jest wyznaczana pośrednio np. z DTM, może też być atrybutem obiektu). Spektakularnym przejawem tego kierunku rozwoju GIS jest lawinowo rosnąca popularność trójwymiarowych modeli miast prezentowanych także w Internecie. Póki co modelowane są głównie budynki, często na relatywnie wysokim stopniu abstrakcji. ALS jest postrzegana jako technika pozyskiwania danych do tworzenia modeli o dużej dokładności i szczegółowości.

Potencjał techniczny lotniczego skanowania laserowego

Zasada działania lotniczego skanowania laserowego jest opisana w wielu publikacjach, m.in. w (Kurczyński 1999, 2006). Dlatego ograniczono się do najistotniejszych informacji oraz przedstawiono tendencje rozwojowe z ostatniego okresu.

System skanowania laserowego obejmuje segment pokładowy i naziemny, na które składają się:

- segment pokładowy:
 - mechanizm skanujący z dalmierzem laserowym (sensor),
 - odbiornik GPS do określania pozycji i urządzenie INS (*Inertial Navigation System*) do określania nachylenia sensora,
 - blok rejestracji danych (dyski twarde o podwyższonej odporności na wstrząsy),
- segment naziemny:
 - naziemna stacja referencyjna GPS jako komponent umożliwiający zastosowanie metody różnicowej DGPS do wyznaczenia chwilowej pozycji sensora,
 - robocza stacja do przetwarzania danych (korekcje błędów systematycznych, integracja pomiarów – wykonanych w szeregach – w bloki).

Na pokładzie statku powietrznego, obok sensora laserowego, zazwyczaj umieszczana jest semi-fotogrametryczna kamera cyfrowa.

W ALS stosuje się różne mechanizmy skanujące, powodujące „przechwytywanie obszarów różnymi wzorcami”. Stosuje się skanowanie w postaci linii układających się w zygzak, linii równoległych w przybliżeniu prostopadłych do kierunku lotu, linii elipsoidalnych oraz linii równoległych wzajemnie i do kierunku lotu, co odpowiada wymienionym w tabeli 1 typom skanowania, w kolejności: lustro oscylujące, lustro obrotowe, lustro wygięte, światłowodowy. (Wehr, Lohr, 1999). Każdy z czterech typów skanowania jest stale udoskonalany i znajduje porównywalne zastosowanie w praktyce. Przykład zbioru punktów powstałego w wyniku skanowania quasi-eliptycznego pokazany jest na rysunku 1.

Kolejne impulsy laserowe wysyłane są z relatywnie wysoką częstotliwością co powoduje, że obszar skanowania jest opisany przez zbiór punktów X,Y,Z o średniej wzajemnej odległości XY rzędu decymetrów (w tabeli 1 podana jest gęstość skanowania). Pomimo emisji impulsów w równych odstępach czasu, odległości między punktami nie są jednakowe. Wynika to z przechyłów statku powietrznego podczas skanowania, jak i nieregularnej pracy

Tabela. Zestawienie podstawowych parametrów technicznych najpopularniejszych ALS

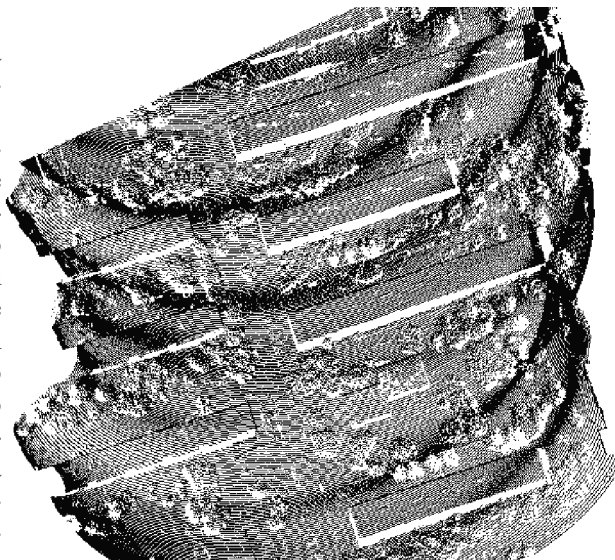
FALCON II	FALCON III	HARRIER 56	HARRIER 24	ALTM 3100	ALTM 3100EA	FLJ-MAP 400	TopEye Mk II	ALS50	ALS50-II	LITEMAPPER 5600	LITEMAPPER 2400	SYSTEM
TopoSys	TopoSys	TopoSys	TopoSys	Optech	Optech	Fugro	Saab	Leica	Leica	IGI mbH	IGI mbH	produce nt
S/H	S/H	S/H	H	S	S	H	S/H	S/H	S/H	S/H	H	platforma
30/2500	30/2500	30/1500	30/450	80/3500	80/3500	5/400	60/1000	-/4000	200/6000	30/1800	10/200	min/max wysokość [m]
światło- wodowy (Fiber switch)	światło- wodowy (Fiber switch)	lustr obrotowe (Rotating polygon)	lustr obrotowe (Rotating polygon)	oscylujące lustr (Oscillating mirror)	oscylujące lustr (Oscillating mirror)	lustr obrotowe (Rotating polygon)	wygięte lustr (Nitiating mirror)	oscylujące lustr (Oscillating mirror)	oscylujące lustr (Oscillating mirror)	lustr obrotowe (Rotating polygon)	lustr obrotowe (Rotating polygon)	typ skanera
14°	27°	45° lub 60°	60° (80° – opcja)	0 ± 25°	0 ± 25°	60°	14°-20°	75° (± 10-37,5°)	75°	± 22,5° (45°) ± 30° (60°)	± 30°(60°) ± 40°(80°)	kąt skanowania
0,25 AGL	0,47 AGL	0,83 AGL (45°) 1,15 AGL (60°)	1,00 AGL	0-0,93 AGL	0-0,93 AGL	1,14 AGL	0-0,73 AGL	1,53 AGL	1,53 AGL	0,83 AGL (45°) 1,15 AGL (60°)	1,15 AGL (60°) 1,68 AGL (80°)	zasięg poprzeczny skanowania
0,5 mrad	0,7 mrad	0,5 mrad	2,7 mrad	0,2 mrad lub 0,8 mrad	0,3 mrad lub 0,8 mrad	-	1 mrad	0,33 mrad	0,22 mrad	0,5 mrad	3 mrad	rozbieżność wiązki
10 cm (200 m AGL)	14 cm (200 m AGL)	10 cm (200 m AGL)	54 cm (200 m AGL)	4 cm lub 16 cm (200 m AGL)	6 cm lub 16 cm (200 m AGL)	-	20 cm (200 m AGL)	6,6 cm (200 m AGL)	4,4 cm (200 m AGL)	10 cm (200 m AGL)	60 cm (200 m AGL)	terenowy wymiar planki
1560 nm	-	1550 nm	905 nm	1064 nm	1064 nm	-	1550 nm	1064 nm	1064 nm	1550 nm	905 nm	długość fali
83	50-125	50 (45°) 66 (60°)	10	33-100	33-100	150	50	83	150	50 (45°) 66 (60°)	10	częstość impulsu [k/Hz]
653 Hz	165 Hz - 415 Hz	5 Hz - 160 Hz	6 Hz - 80 Hz	zmienna; max 70 Hz	zmienna; max 70 Hz	150 Hz	-	0-70 Hz	90 Hz	5-160 Hz	6-80 Hz (60°) 5-60 Hz (80°)	częstość skanowania
27 (400 m AGL)	21 (400 m AGL)	15 (200 m AGL)	1 (200 m AGL)	-	-	37 (200 m AGL)	25 (200 m AGL)	-	-	H: 11 (200 m AGL); 7,5 (300 m AGL); S: 3,7 (300 m AGL)	2,2 (200 m AGL)	gęstość (pkt/m²)
-	<0,2/<0,1	0,19/0,07 (800 m AGL)	0,12/0,06 (200 m AGL)	0,0005xAGL /0,15-1200 m AGL	0,00018xAGL /0,05-500 m AGL	0,08/0,05	-	±0,15-0,75 / ±0,15-0,50	±0,10-0,65 / ±0,10-0,24	0,1/0,03 (800 m AGL)	0,04/0,02 (200 m AGL)	dokładność pozioma/ pionowa [m]

S – samolot, H – helikopter AGL – wysokość ponad terenem (Above Ground Level);

samego mechanizmu skanowania. Ponadto na rozkład punktów ma wpływ wychylenie kierunku impulsu od nadiru, a także rzeźba terenu.

.W tabeli 1 zamieszczono specyfikację techniczną systemów które pojawiły się po 2000 r. Pokazano także systemy które dopiero wchodzi do użycia (np. Leica ALS50-II, Falcon III). System HARRIER 56 stosuje skaner Riegl LMS-Q560, a HARRIER 24 skaner Riegl LMS-Q240i, dlatego w tabeli nie zamieszczono osobno specyfikacji systemów Riegl-a. W tabelce nie zamieszczono też danych dla systemów ALMIS-350 oraz ALTMS-4036 (Terrapoint) oraz produkowanych przez Laseroptronix z powodu braku opublikowanej specyfikacji.

W stosunku do skanerów z drugiej połowy lat 90. XX w. można zauważyć wyraźną poprawę parametrów. Producenci zwiększają częstotliwość, zasięg, dokładności. Standardem staje się skanowanie z gęstością kilkunastu pkt/m². Tymczasem przy gęstości 1 pkt/m² na powierzchnię 1 km² przypada 1 mln punktów! Praktycznie wszystkie skanery współpracują z cyfrowymi kamerami fotograficznymi. Systemy Harrier, Falcon III opcjonalnie oraz LITEMAPPER 5600 umożliwiają analizę pełnego pasma odbitej fali. Pozostałe w większości wykrywają 4 odbicia, z wyjątkiem LITEMAPPER 2400 i FALCON II, które ograniczają się do pierwszego i ostatniego. Niektórzy producenci umożliwili zamontowanie swoich systemów na samolotach jak i helikopterach. Wykonując nalot helikopterem uzyskuje się większą gęstość punktów wynikającą z mniejszej prędkości statku powietrznego.



Rys. 1. Zbiór punktów powstały w wyniku skanowania „eliptycznego” (rzut na płaszczyznę poziomą)

Przegląd stosowanych metod wykrywania i modelowania budynków

Przez wykrywanie (ang. *detection, extraction*) budynków na podstawie danych ALS rozumie się identyfikację punktów, które reprezentują odbicie impulsu od dachów budynków co umożliwia określenie obrysów budynków lub ich zwartych kompleksów ale bez szczegółowej informacji dotyczącej atrybutów budynków (Cho i in., 2004). Jeśli obok obrysu budynku określane są kształt i rozmiary 3D, wówczas mówi się o modelowaniu bądź rekonstrukcji budynków. Terminologia jednak nie jest ustabilizowana, niektórzy autorzy w pojęciu ekstrakcja zawierają także modelowanie budynków, niektórzy zaś uznają, że samo wskazanie punktów należących do budynków jest już modelowaniem.

Zagadnienie wykrycia a następnie modelowania budynków jest z reguły bardzo złożone, zwłaszcza w przypadku zabudowy zwartej i jednocześnie zróżnicowanej wysokościowo. Poszukuje się zarówno metod półautomatycznych, wspomaganych przez operatora, jak i rozwiązań w pełni automatycznych (Gruen, 1997; Paparoditis i in., 1998; Mayer, 1999; Maas, Vosselman, 1999; Brenner, 2001; Baltsavias, 2004). Zdobyte doświadczenia zostały zaimplementowane w specjalistycznym oprogramowaniu, które oprócz generowania DTM lub DSM z *chmury punktów* pozwala na tworzenie modeli budynków (np. TerraScan).

W latach 2002–2004 pod auspicjami EuroSDR (*European Spatial Data Research* – <http://83.138.131.106/euroedr/2002/index.htm>) został wykonany interesujący projekt polegający na porównaniu różnych metod ekstrakcji budynków (Ahokas i in., 2005). W badaniach wykorzystano identyczne dane dla wszystkich metod. Celem projektu była ocena jakości, szybkości wykonania oraz aspektów ekonomicznych:

1. semi-automatycznej ekstrakcji budynków technikami fotogrametrycznymi,
2. semi-automatycznej i automatycznej ekstrakcji budynków z wykorzystaniem danych ALS,
3. semi-automatycznej i automatycznej ekstrakcji budynków z wykorzystaniem zintegrowanych danych fotogrametrycznych i ALS.

Wyniki potwierdziły wcześniejsze doniesienia o zaskakująco wysokiej dokładności danych ALS, porównywalnej z dokładnościami fotogrametrycznymi uzyskiwanymi z wielkoskalowych zdjęć lotniczych. Ponadto stwierdzono, że łączenie techniki lidarowej i fotogrametrycznej skutkuje efektem synergicznym i taka fuzja najlepiej rokuje w aspekcie automatyzacji procesu wykrywania i modelowania obiektów. Wskazano także na walory metod kombinowanych z dodatkowym użyciem map katastralnych, technicznych, topograficznych, nie wykluczając obrazów satelitarnych.

Metody wspomagania danych ALS o inne, niezależnie pozyskane informacje są proponowane przez wielu autorów (Brenner, 2000; Vosselman, Dijkman, 2001; 2003; Sohn, Dowman, 2002). Ciekawą metodę wykrywania budynków wspomaganą zdjęciami lotniczymi zaproponowali (Schenk i in., 1999). Metoda ta ogranicza się do określenia obrysu budynku. Inny autor (Ameri, 2000) proponuje segmentację na zdjęciu lotniczym, jak i na (pseudo)rastrze DSM, a następnie łączy krawędzie uzyskane w dwóch podejściach w celu polepszenia ich geometrii. Podobna technika półautomatycznej ekstrakcji została zaproponowana przez Rottensteinera (2001).

Osobną grupę stanowią metody wykorzystujące głównie dane ALS (czasami występuje w nich element wspomagania innymi danymi jako tzw. *post-processing*). Co prawda wiadomo już, że najlepsze wyniki osiąga się integrując dane z różnych źródeł, tym niemniej tak postawiony problem badawczy jest interesujący z poznawczego punktu widzenia i dlatego jest rozważany w dalszej części niniejszej pracy. Metody oparte na danych ALS można podzielić na dwie podgrupy: wykorzystujące dane oryginalne oraz takie, które analizują dane wtórne w postaci siatki regularnej.

Reprezentantem pierwszej podgrupy jest metoda konstruująca model pokrycia terenu w postaci TIN (ang. *Triangular Irregular Network*); przed przystąpieniem do detekcji konieczna jest strukturyzacja danych, najczęściej z wykorzystaniem triangulacji 2D Delaunay'a. (Morgan, Habit, 2001). Innym przykładem ekstrakcji budynków z oryginalnej chmury punktów jest metoda, polegająca na wyznaczeniu linii prostych w określonym rzucie na płaszczyznę punktów pomiarowych (Schwalbe 2001). Ze względu na różne kształty da-

chów wymagania algorytmów detekcji są zróżnicowane. Niestety, nie wszystkie elementy budynku mogą być wyznaczone, dlatego pomocny jest określony model *a priori* (charakterystyczny dla większości budynków na badanym terenie).

Drugi nurt metodyczny analizuje dane przekształcone do postaci regularnej siatki (ang. *grid*). Taka postać danych jest jednocześnie wadą i zaletą. Wadą dlatego, że nie korzysta się *de facto* z danych oryginalnych lecz z ich siatkowej reprezentacji. Natomiast zaletą tej reprezentacji jest możliwość prowadzenia analiz za pomocą dobrze znanych operacji z zakresu przetwarzania obrazów i GIS rastrowego. W literaturze opisano wiele sposobów detekcji budynków, w których wykorzystano siatką regularną (Maas, 1999; Dash i in., 2004; Matikainen i in., 2003). Szczególnie należy wyróżnić metodę opublikowaną przez (Rottensteiner, Briese, 2003), w której w pierw automatycznie są wykrywane rejony występowania budynków, a następnie wyznacza się płaszczyzny dachu przez segmentację uwzględniającą krzywizny (potem model jest ulepszany przy pomocy wszelkich dostępnych informacji). Ekstrakcję różnych obiektów przez klasyfikację z wykorzystaniem analizy tekstury na zdjęciach lotniczych zaproponował Fuchs (1998).

Po wykonaniu prawidłowej klasyfikacji punktów można rozpocząć geometryczne modelowanie obiektów 3D. Obecnie w modelowaniu można rozróżnić dwa podejścia, które w efekcie prowadzą do uzyskania dwóch różnych modeli: modelu parametrycznego i modelu nieparametrycznego (ogólny).

Model parametryczny oparty jest na uprzednim zdefiniowaniu cech charakterystycznych budynku – parametrów geometrycznych (ang. *top-down*). Modele są uzyskiwane przez minimalizację różnicy między oczekiwanym a rzeczywistym modelem opisanym przez punkty laserowe, aż do momentu osiągnięcia optymalnej zgodności modeli (Maas, Vosselman, 1999). Analizowane są wartości parametrów, co umożliwia określenie: położenia budynku, głównych kątów załamania dachów, nachylenia płaszczyzn dachów, wysokość budynku oraz jego powierzchnię. Takie rozwiązanie pozwala uzyskać model zgodny z rzeczywistym. Jednak metoda ta stosowana jest tylko dla budynków o regularnych kształtach, występujących na obszarach o rzadkiej zabudowie.

Metoda nieparametryczna (ang. *bottom-up*) oparta jest na analizie chmury punktów. Na początku wybiera się obszary homogeniczne, a następnie wyznacza się płaszczyzny dachu wykorzystując segmentację uwzględniającą krzywizny. Płaszczyzny są grupowane, określany jest kształt krawędzi dachu, a cały model jest ulepszany dzięki integracji wszelkich dostępnych informacji, w tym dotyczących geometrii (Rottensteiner i Briese, 2003). Wysokość budynku i położenie określane jest na podstawie rozkładu punktów terenowych. Model ten jest bardziej elastyczny niż model parametryczny. Korzysta się w nim często z dodatkowych informacji pozyskanych np. z ortofotomapy lub fotogrametrycznego modelu stereoskopowego.

Eksperyment badawczy

Przeprowadzono eksperyment polegający na wykryciu budynków za pomocą dwóch metod, z których jedna wykorzystuje do analizy dane oryginalne, a druga – dane przetworzone do siatki regularnej (Bucior, 2006).

Metody bazujące na *chmurze punktów* są z natury bardziej skomplikowane, dlatego wykorzystano specjalistyczny program TerraScan, jeden z modułów pakietu firmy TerraSolid (Soininen, 2003). Rekomendacją dla tego programu są obiecujące rezultaty opisywane w publikacjach (Crosilla i in., 2004; 2005), efektywność programu była także analizowana w projekcie EuroSDR.

Druga z testowanych metod, określana dalej jako analiza rastrowa (poprawniejsze jest określenie – pseudorastrowa), jest syntezą rozwiązań opisanych w uprzednio cytowanej literaturze, ma charakter analizy wieloczynnikowej, a ostateczny rezultat to wynik złożenia obrazów pośrednich. Wykonanie tych operacji pierwotnie zaplanowano w programie Idrisi, a później uzupełniono o program do specjalistycznej analizy tekstury.

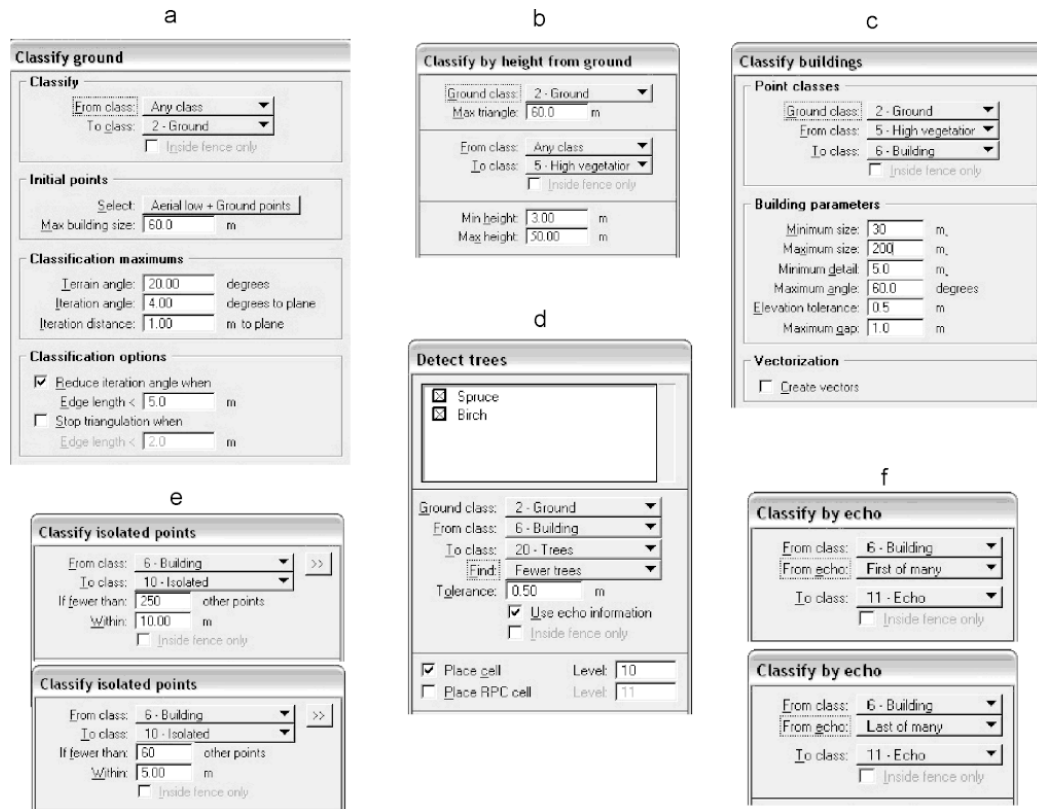
Ekstrakcję budynków przeprowadzono na danych udostępnionych przez Biuro Planowania Przestrzennego Urzędu Miasta Krakowa, dla potrzeb dydaktycznych i badawczych na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH. Podstawowe parametry charakteryzujące wykonany w 2004 r. nalot nad fragmentem Krakowa są następujące:

- mechanizm skanujący TopEye Mk II, częstotliwość impulsu lasera 50 kHz,
- średnia wysokość lotu 530 m nad terenem, średnia prędkość lotu 45 km/h,
- szerokość pasa skanowania ok. 200 m – 9 pasów o pokryciu poprzecznym ok. 50 m,
- średnia gęstość rejestrowanych punktów 1,5 pkt/m²,
- rejestracja liczby odbić pojedynczego impulsu laserowego oraz intensywności odbicia,
- zapis danych w układzie UTM, format binarny.

Do badań wybrano dwa obszary testowe, o powierzchni ok. 10 ha każdy, nazwane umownie jako *łatwy* i *trudny*, dla których dysponowano zbiorem ok. 1 mln punktów z ALS. Na obszarze *łatwym* są zlokalizowane bloki wielorodzinne, powtarzalne, z płaskimi lub lekko nachylonymi dachami, wolnostojące wśród zieleni (typowe osiedle z lat 70. ubiegłego wieku). Natomiast obszar *trudny* to zabudowa podmiejska z przełomu XIX i XX wieku, później wielokrotnie przebudowywana; jest zwarta i zróżnicowana wysokościowo.

Algorytm TerraScan

Proces detekcji budynków w programie TerraScan ma charakter etapowy, przy czym można wyróżnić dwie główne fazy: pierwsza to *zgrubne* wskazanie punktów należących do budynków, a druga to poprawianie wstępnej klasyfikacji. W ramach fazy pierwszej w pierwszej kolejności identyfikuje się punkty leżące na terenie stosując metodą aktywnego modelu TIN (a), potem wyniesione ponad teren o założoną wielkość (b), a następnie leżące prawdopodobnie na dachach budynków (c). Natomiast w drugiej fazie z uprzednio wyselekcjonowanego zbioru punktów usuwa się kolejno punkty mogące leżeć na koronach drzew (d), potem tzw. punkty odizolowane (e) oraz te, dla których wystąpiło więcej niż jedno odbicie impulsu laserowego (f). W poszczególnych etapach a–f deklaruje się szereg krytycznych dla wyników algorytmu parametrów, co pokazano na rysunku 2. Uzyskany wynik jest pokazany na rysunku 3a i 3d, odpowiednio dla obu obszarów testowych (łatwego i trudnego).

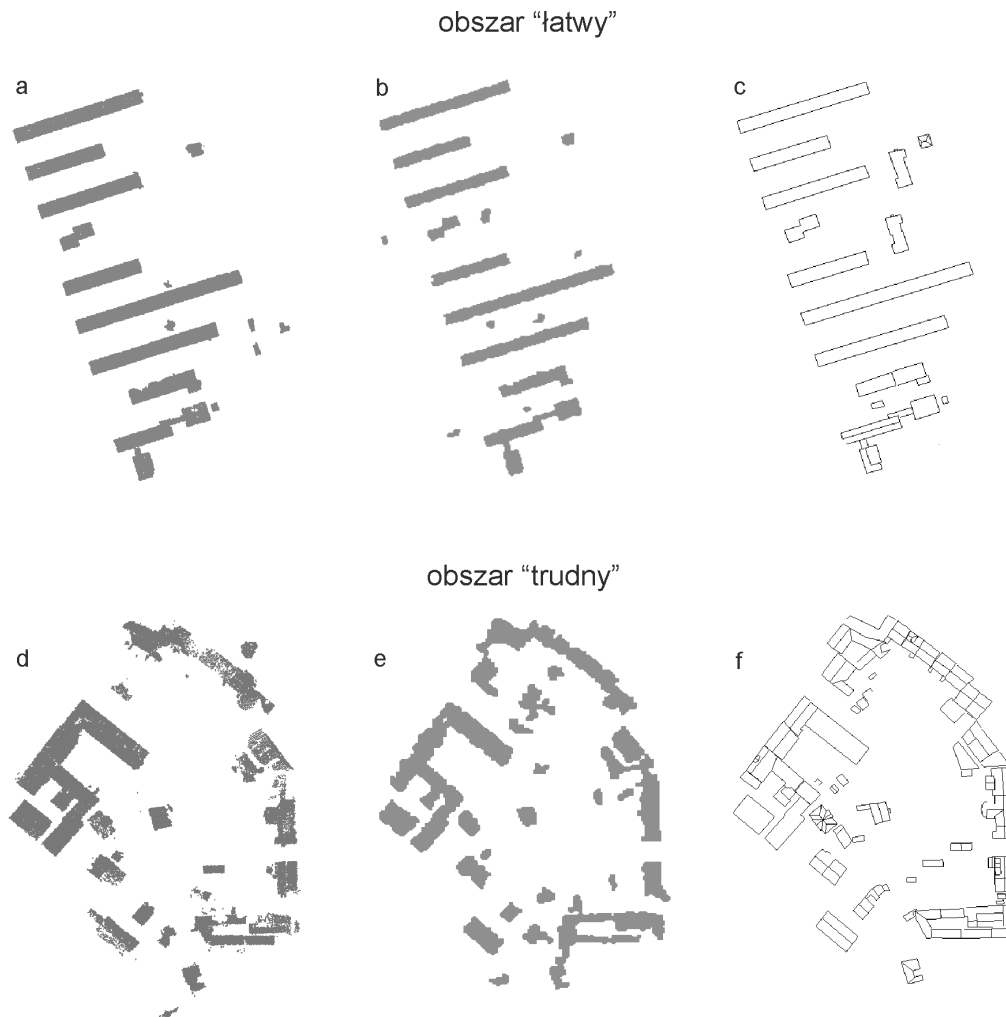


Rys. 2. Parametry deklarowane dla kolejnych etapów detekcji budynków (dla obszaru testowego I) – w programie TerraScan; etapy a–f opisane w tekście

Analiza rastrowa

Pierwszą czynnością było utworzenie siatki kwadratowej w której węzłach są zapisane wysokości. Przy pomocy interpolacji udostępnianej przez program TerraSolid wygenerowano siatkę o interwale 1m, czyli o gęstości zbliżonej do średniej gęstości danych oryginalnych, co jest zgodne z zaleceniami znanymi z literatury (Smith i in., 2004). Tak uzyskany wtórny zbiór danych wysokościowych w formacie ASCII wprowadzono do programu Idrisi i utworzono plik rastrowy, w którym atrybut piksela odpowiada wysokości.

W dalszych działaniach siatkę wysokościową traktowano jak obraz cyfrowy (struktura jest taka sama) i generowano obrazy wtórne: obraz spadków – jako tzw. pierwsza pochodna, obraz krzywizny – jako tzw. druga pochodna obrazu wysokości. W trakcie wstępnych badań stwierdzono, że występuje problem z odizolowaniem pikseli reprezentujących budynki i wysokie drzewa o rozłożystych koronach. Konieczne stało się przyjęcie dodatkowego parametru charakteryzującego teksturę obrazu wysokości (tj. przestrzenne związki zachodzące pomiędzy wysokościami), ułatwiającego separację drzew i budynków. Parametry tekstury liczone w programie Idrisi uznano za zbyt uproszczone i sięgnięto po program MaZda, opracowany w Instytucie Elektroniki Politechniki Łódzkiej, udostępniany bezpłatnie w Internecie



Rys. 3. Wyniki detekcji budynków: lewa kolumna – algorytm TerraSolid (a,d), środkowa – analizy rastrowe (b,e), prawa kolumna – model referencyjny (c,f)

(Materka i in., 2001). Po wykonaniu wielu prób, za najlepszy wskaźnik różnicujący teksturę dachów i drzew wybrano drugi moment kątowy (ang. *angular second moment*) (Rudnicki, 2002).

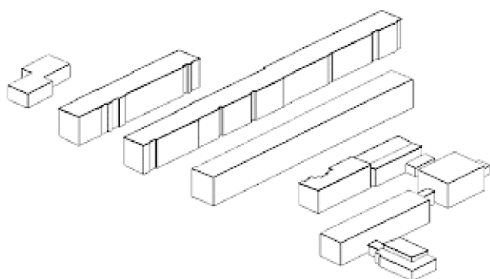
Ostatecznie analiza składała się z trzech etapów, w każdym wykorzystywano inny obraz:

- wskazanie pikseli leżących ponad 3 m nad terenem i tworzących skupiska o powierzchni większej od 20 m² (analiza obrazu wysokości),
- identyfikacja miejsc gdzie tekstura wyrażona przez drugi moment kątowy odpowiada płaszczyznom dachów (poziomym lub nachylonym), czyli odseparowanie miejsc w których jest bardzo zmienna tekstura (analiza obrazu tekstury),
- detekcja miejsc o spadkach powyżej 40⁰ (analiza obrazu spadku).

Na każdym etapie generowano obrazy o wartościach $[0,1]$, gdzie 1 oznacza spełnienie, a 0 – niespełnienie określonych warunków. Tak uzyskane obrazy składowe były składnikami analizy wieloczynnikowej obejmującej sekwencję działań takich jak iloczyn logiczny obrazów i różnica. Ostateczny wynik w postaci obrazów zawierających piksele należące do budynków przedstawiony jest na rysunkach 3b i 3e, odpowiednio dla obu obszarów testowych.

Wyniki

Dla potrzeb analizy skuteczności wykrywania budynków testowanymi metodami opracowano wzorzec budynków. Do tego celu wykorzystano model stereoskopowy złożony ze zdjęć w skali 1:13000 i na stacji fotogrametrycznej dokonano stereodigitalizacji dachów.



Rys. 4. Model budynków opracowany za pomocą TerraScan

Następnie porównywano wzorzec z wynikami eksperymentów, biorąc pod uwagę liczbę wykrytych budynków oraz globalną powierzchnię w odniesieniu do wzorca. Opracowany model referencyjny jest pokazany na rysunkach 3c i 3f, obok wyników z obu testowanych metod.

Stwierdzono, że na obszarze o rozproszonej i wielkogabarytowej zabudowie lepsze wyniki daje algorytm TerraScan. Tą metodą zostały wykryte praktycznie wszystkie budynki, krawędzie ich są prostoliniowe. Warto nadmienić, że w tym programie można modelować wykryte budynki co pokazuje rysunek 4 (do modelowania jest stosowane opisane uprzednio rozwiązanie nieparametryczne).

Dla obszaru o zwartej zabudowie różnica pomiędzy wynikami z obu testowanych metod jest znacznie mniejsza. Jeśli weźmie się pod uwagę bilans powierzchni w odniesieniu do modelu referencyjnego, wówczas korzystniej wypada metoda oparta na analizie rastrowej.

Należy jednak wziąć pod uwagę fakt, że w zbiorze danych ALS dla niektórych dachów wystąpiły *białe plamy*, skoncentrowane w północno-wschodniej części testowanego obszaru co obniżyło stopień wykrycia budynków na podstawie *chmury punktów*.

Podsumowanie

Dzięki coraz doskonalszym instrumentom ALS zapewnia coraz wyższe dokładności określania współrzędnych XYZ, co – razem z olbrzymią wydajnością pomiaru – czyni tę technikę konkurencyjną dla fotogrametrii w zakresie pozyskiwania danych punktowych. Co ciekawe techniki te nie konkurują ze sobą a wzajemnie się wspomagają – od kilku już lat na platformach latających obok skanera laserowego montuje się cyfrowe kamery fotograficzne, a typowymi produktami takich hybrydowych misji są zarówno dyskretne modele powierzchni, jak i ortofotomapy.

Dane rejestrowane techniką ALS stanowią dogodny punkt wyjścia do automatyzacji procesu wykrywania i modelowania obiektów. Zostało to już udowodnione w wielu publikacjach, przy czym początkowo badania dotyczyły detekcji budynków o relatywnie prostych, powtarzalnych kształtach, czemu odpowiada „łatwy” obszar testowy wytypowany do relacjonowanych w pracy eksperymentów. W miarę doskonalenia metod stopniowo rozważa się również trudniejsze przypadki, reprezentatywnym przykładem jest drugi z badanych w pracy obszarów testowych.

Jak pokazuje dokonany przegląd literatury, proponuje się wiele metod wykrywania obiektów, żadna jednak nie może być uznana jako wystarczająco efektywną, ponadto osiągnięta wiarygodność wciąż nie jest zadowalająca. Wiadomo, że najlepsze wyniki uzyskuje się integrując dane z różnych źródeł. Wiele problemów których nie rozstrzyga ALS daje się rozwiązać za pomocą zdjęć lotniczych (wykonywanych podczas tego samego nalotu z reguły kamerami semi-pomiarowymi); w sukurs przychodzą też dane katastralne. Ponadto sama technika ALS jest w dalszym ciągu doskonalona, duże nadzieje wiąże się zwłaszcza z systemami typu *full waveform*, czyli rejestrującymi wiele odbić impulsu laserowego.

Przeprowadzone eksperymenty badawcze potwierdzają, że dostępne oprogramowanie komercyjne spisuje się poprawnie w terenach o rozproszonej zabudowie, przy czym występują kłopoty z odseparowaniem rozłożystych drzew o podobnej do budynków wysokości. Skuteczność zaproponowanego postępowania (pseudo) rastrowego jest podobna, poziom wykrywalności budynków kształtuje się na poziomie 60-90% w zależności od charakteru zabudowy, przy czym nieco lepsze wyniki - aniżeli przy pomocy komercyjnego oprogramowania - uzyskiwano dla zwartej zabudowy. Jednakże testowana metoda nie pozwala na modelowanie 3D, które powinno się odbywać na danych oryginalnych. Wyobrażalne jest jej zastosowanie do wskazywania miejsc występowania zabudowy wraz z głównymi kierunkami jej przestrzennego usytuowania, co pozwala wytypować optymalne miejsca dla wykonywania przekrojów pionowych przez *chmurę punktów*, które dają się wykorzystać do dalszego wymiarowania i modelowania budynków (np. z wykorzystaniem transformacji Hough). Jak wynika z doświadczeń autorów pracy, dla potrzeb modelowania 3D nie jest konieczne dokładne ustalenie obrysu budynków lecz pewne jego przybliżenie – w trakcie modelowania dane analizowane są na nowo i określany jest obrys 3D.

W ramach badań przeanalizowano wszystkie przypadki w których detekcja budynków była nieskuteczna. Dużą przeszkodą okazały się wysokie drzewa, często wznoszące się ponad dachami budynków. Ponadto dane ze skanowania zawierały dość liczne miejsca, w których LIDAR mierzył z bardzo małą gęstością, kilkukrotnie mniejszą niż średnia wynosząca 1,5 pkt/m². Te *dziury* bardziej obniżyły skuteczność metody pierwszej. Natomiast słabością metody opartej o analizy rastrowe była mała reprezentatywność siatki w miejscach drzew – zastosowana interpolacja zbyt gładzała dane źródłowe

Automatyzacja wykrywania i modelowania jest już obecna w liniach technologicznych firm produkcyjnych. Konieczne jest jednak dalsze jej doskonalenie, gdyż w centrach miast, a zwłaszcza w obszarach zabytkowych, czyli tam gdzie istnieje największy popyt na modele przestrzenne, dotychczas wdrożone rozwiązania są zbyt mało skuteczne.

Literatura

- Ahokas, Kaarttinen, Hyyppä J., 2005: EuroSDR Building Extraction comparison. Final Report.
- Ameri B., 2000: Automatic Recognition and 3D Reconstruction of Buildings from Digital Imagery. PhD Thesis, Institute of Photogrammetry, Stuttgart University, DGK-C 526. 32 (3/1), pp. 400-408.
- Axelsson P., 1999: Processing of laser scanner data – algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54, 138-147.
- Baltsavias E.P., 1999a: Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54 (1999). 164–198.
- Baltsavias E.P., 1999b: Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54 (1999). 199–214.
- Baltsavias E.P., 2004. Object extraction and revision by image analysis using existing geodata and knowledge: current status and steps towards operational systems. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58(3-4): 129-151.
- Borkowski A., 2003: Modelowanie powierzchni terenu zawierającej linie nieciągłości na podstawie danych skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol.13B, 307-314.
- Borkowski A., 2005: Filtracja danych lotniczego skaningu laserowego z wykorzystaniem metody aktywnych powierzchni. *Roczniki Geomatyki* 2005, t. III z. 4. 35-42.
- Bucior M., 2006: Wykrywanie budynków na podstawie lotniczego skaningu laserowego. Praca magisterska, AGH, Wydział Geodezji Górniczej Inżynierii Środowiska.
- Brenner C., 2000: Towards fully automatic generation of city models. *IAPRS* 33 (B3), 85-92.
- Brenner C., 2001: City models – automation in research and practise. *Photogrammetric Week '01*, pp. 149-158.
- Cho W., Jwa Y.S., Chang H.J., Lee S.H., 2004: Pseudo-grid Based Building Extraction Using Airborne Lidar Data, *ISPRS*, Comm. 3.
- Crosilla F., Visintini D., Prearo G., 2004: A Robust Method for Filtering Non-Ground Measurements from Airborne Lidar Data. *ISPRS XXth Congress Comm.* 3.
- Crosilla F., Visintini D., Sepic F., 2005: A segmentation procedure of LiDAR data by applying mixed parametric and nonparametric models. *ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop „Laser scanning 2005”*, Enschede.
- Dworak T. Z., 1990: Metodyka teledetekcyjnych badań zapylenia atmosfery. *ZN AGH*, nr 1339, seria *Sozologia i Sozotechnika*, z. 29.
- Fuchs C., 1998: Extraktion polymorpher Bildstrukturen und ihre topologische und geometrische Gruppierung. PhD Thesis, Institute of Photogrammetry, Bonn University, DGK-C 502.
- Gruen, A., Baltsavias E.P., Henricsson O., 1997: Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II), Birkhauser Verlag.
- Hyyppä J., Pyssalo U., Hyyppä H., Samberg A., 2002: Elevation accuracy of laser scanning – derived digital terrain and target models in forest environment. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV / 3A, Graz.
- Kurczyński Z., 1999: Lotniczy skaner laserowy – nowa technologia pozyskiwania danych o rzeźbie terenu. *Geodeta* nr 2 (45).
- Kurczyński Z., 2006: Lotniczy skaning laserowy (LIDAR). <http://www.geoforum.pl/> (dostęp 24.07.2006).
- Maas H.G., Vosselman G., 1999: Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54 (2-3), pp. 153-163.
- Marmol U., 2003: Pozyskanie numerycznego modelu powierzchni topograficznej (NMPT) w oparciu o dane wysokościowe pochodzące z lotniczego skanera laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol.13B, 419-426.
- Marmol U., 2005: Filtrowanie danych wysokościowych pochodzących z lotniczego skanera laserowego, Rozprawa doktorska, AGH, Kraków.
- Materka A., Szczypiński P., Kociołek M., Strzelecki M., 2001: Computer program for image texture analysis in PhD students laboratory, Instytut Elektroniki Politechniki Łódzkiej, 2001.
- Matikainen L., Hyyppä J., Hyyppä H., 2003: Automatic detection of buildings from laser scanner data for map updating. In: *IAPRSIS XXXIV / 3W13*.
- Mayer H., 1999: Automatic object extraction from aerial imagery – A survey focusing on buildings. *Computer Vision and Image Understanding*, 74(2):138-149.

- Morgan M., Habib A., 2001: 3D TIN for Automatic Building Extraction from airborne Laser Scanning Data, Proceedings of the ASPRS "Gateway to the New Millennium".
- Paparoditis N., Cord M., Jordan M., Cocquerez J.P., 1998: Building detection and reconstruction from mid- and high-resolution aerial imagery. *Computer Vision and Image Understanding*, 72(2).
- Rudnicki Z., 2002: Wybrane metody przetwarzania i analizy cech obrazów teksturowych. Zakład Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, AGH, Kraków.
- Rottensteiner F., 2001: Semi-automatic extraction of buildings based on hybrid adjustment using 3D surface models and management of building data in a TIS. PhD Thesis. Geowissenschaftliche Mitteilungen 56, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology.
- Rottensteiner, F., Briese, C., 2003. Automatic generation of building models from LIDAR data and the integration of aerial images. [In:] *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Dresden, Germany, Vol. XXXIV, Part 3/W13, pp. 174-180.
- Schenk T., Csatho B., Lee D.C., 1999: Quality control issues of airborne laser ranging data and accuracy study in an urban area. Proceedings of the ISPRS Workshop – ISPRS WG III/5, WG III/2:
- Schwalbe E., 2004: 3D building model generation from airborne laserscanner data by straight line detection in specific orthogonal projections, ISPRS, Commission 3.
- Smith, Holland, Longley: The importance of understanding error in Lidar Digital Elevation Models, ISPRS, Commission 4, 2004.
- Sohn G., Dowman I., 2002: Terrain surface reconstruction by the use of tetrahedron model with the MDL criterion. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV / 3A, 336-344, Graz.
- Soininen A., 2003: TerraScan. User Guide. Terrasolid.
- Wehr A., Lohr U., 1999: Airborne laser scanning-an introduction and overview, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54 (1999).68–82.
- Vosselman G., Dijkman S., 2001: 3D building model reconstruction from point clouds and ground plans. *IAPRS* 34(3W4): 37-43.

Summary

This paper discusses automatic detection of buildings from airborne laser scanner data. Beside introduction and conclusions there are three main parts in this paper. In part one basic technical parameters of airborne laser scanning are reminded. Part two presents literature review of various methods that have been applied in the detection and modeling of buildings. Part three describes a research experiment carried out by the authors. This part includes a comparison between two methods of detection: the one offered by specialist software and the alternative method proposed by the authors of this paper.

The technique of laser scanning, often referred to as LIDAR, continues to develop very dynamically. It is characterized by a high level of efficiency and accuracy. It is most often used to create 3D models of cities. Until now, LIDAR was mostly used in national studies to determine digital terrain models (DTM), which is done by separating certain points (those which result from laser reflections of trees, buildings and other above-ground surfaces) from disorganized "clouds of points". Meanwhile, the most useful contribution of this technique is that it enables numeric calculation of the digital surface model (DSM).

The authors' experiment attempted to analyze the effectiveness of automatic detection of buildings using two different methods. The first method used original data and applied specialist software which detects and models buildings. In the second, the "cloud of points" was replaced by a regular grid, which had been determined through interpolation. Then, using the typical tool of GIS, the authors carried out a series of experiments. In this paper, the authors present their concept of detection of buildings. This concept is based on an analysis of three surface layers: map of heights, map of slopes and map of texture. The final stage consisted of spatial analysis which showed all the places which meet certain conditions that are adequate for buildings, such as heights, slopes and texture.

The methods were implemented on two test areas. One area contained independently standing apartment buildings in which the sides and rooftops of buildings were perpendicular and at right angles to each other. The second test area was made up of various buildings of differentiated heights with steep, multidirectional roofs. For both these areas, reference data was obtained through the vectorization of photogrammetric stereoscopic models.

Both methods of detection showed comparable effectiveness. The method using “cloud of points” and specialist software showed slightly straighter roof edges, however a slightly worse balance of surface in relation to the reference data, than the method based on GIS analyses which presents the authors’ concepts of detections of buildings. However, the differences were negligible and both methods had a similar level of effectiveness in the detection of buildings: approximately 90% for the easy area and about 60% for difficult area. These results are similar to those presented in literature.

During the study, all cases in which detection of buildings was ineffective were also analyzed. Tall trees rising above rooftops often presented a significant obstacle. Moreover, the scanning data contained several places, where LIDAR provided measurements with very low density, much smaller than the average density of 1,5 points per m². These „holes” lowered the effectiveness of the first method. However, the weakness of the raster method was weak representation of the grid in places where trees were located as the applied interpolation smoothed out the original data.

The results of this research lead to the conclusion that an optimal method would entail a „combined” approach. First, the raster analysis should be applied to determine the probable location of buildings. Then, for certain atypical spaces one should return to the source data (cloud of points) and vertically assign cross sections in predefined directions. What is still needed is a method of automatic recognition of buildings on the basis of cross sections as well as dimensions of buildings which aim to obtain a 3D model.

This paper confirms a huge potential of the laser scanning technique to create 3D models. The proposed method of detection of buildings proved promising and it can be applied even without expensive specialized software.

mgr inż. Małgorzata Bucior
gosiabucior@yahoo.pl

mgr inż. Natalia Borowiec
nboro@agh.edu.pl

dr inż. Ireneusz Jędrychowski
i.jedrychowski@geo.uj.edu.pl

dr inż. Krystian Pyka
krisfoto@agh.edu.pl

<http://home.agh.edu.pl/~zffit/>