

## **AUTOMATYCZNA BUDOWA WEKTOROWYCH MODELI 3D BUDYNKÓW NA PODSTAWIE DANYCH LOTNICZEGO SKANINGU LASEROWEGO**

### **AUTOMATIC RECONSTRUCTION OF 3D BUILDING SKELETON MODELS BASED ON AIRBORNE LASER SCANNING DATA**

**Małgorzata Jarząbek-Rychard**

Instytut Geodezji i Geoinformatyki, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

SŁOWA KLUCZOWE: modelowanie budynków 3D, LiDAR, ALS, chmura punktów, topologia dachów

STRESZCZENIE: W artykule opisana jest w pełni automatyczna metoda budowy trójwymiarowych modeli budynków przedstawionych za pomocą linii szkieletowych. Budynki rekonstruowane są na podstawie chmury punktów, bez potrzeby wsparcia w postaci dodatkowych informacji i zbiorów danych. Warunek ten dodatkowo komplikuje zadanie rekonstrukcji, lecz jednocześnie czyni przedstawiony algorytm dużo bardziej uniwersalnym. Topologiczny model budynku tworzony jest na podstawie punktów charakterystycznych, wyznaczających miejsca przecięć sąsiednich połączeń dachowych, bądź linii rzutów ścian. Punkty charakterystyczne zlokalizowane na zewnętrznych krawędziach budynków wyznaczane są za pomocą autorskiego algorytmu wykrywającego kontury. W kolejnym etapie rekonstrukcji określone są relacje topologiczne między punktami, które pozwalają na wyznaczenie linii krawędziowych poszczególnych płaszczyzn budynku. Ostatecznie, przeprowadzone jest wyrównanie punktów wierzchołkowych i linii krawędziowych, co pozwala na otrzymanie zregulowanego modelu zabudowy. Algorytm przetestowany został z wykorzystaniem danych lotniczego skaningu laserowego przedstawiających fragment zabudowy małego miasta. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów można stwierdzić, że opisana metoda pozwala na poprawne i wydajne generowanie szkieletowych modeli budynków o skomplikowanej strukturze.

#### **1. WSTĘP**

W ciągu ostatniej dekady zaobserwować można intensywny rozwój skaningu laserowego, któremu towarzyszy wzrastająca świadomość możliwości wykorzystania trójwymiarowych modeli miast. Wynikające z tego stale zwiększające się spektrum zastosowań modeli 3D budynków wymusza zapotrzebowanie na systemy pozwalające na wydajną i dokładną rekonstrukcję zabudowy, niewymagającą ręcznego opracowania. Z kolei względy ekonomiczne przemawiają za metodami modelowania opierającymi się na jednym rodzaju danych – chmurze punktów pozyskanej za pomocą dowolnej metody pomiaru – bez konieczności uzupełniania ich dodatkowymi informacjami. Pomimo intensywnych badań w tym obszarze, większość opracowanych metod generowania modeli to metody półautomatyczne bądź wykorzystujące dodatkowe dane (Brenner, 2005, Novachewa, 2008, Borowiec, 2010).

Wśród wielu istniejących metod rekonstrukcji wyróżnić można dwa podstawowe podejścia: (Dorniger, Pfeiffer 2008): oparte na wstępnie założonym modelu budynku (*model driven*) oraz rekonstruujące poszczególne elementy obiektu bezpośrednio w oparciu o dane (*data driven*). W pierwszym z nich wykorzystywana jest predefiniowana biblioteka kształtów dachów, bądź też ich składowych elementów i ich możliwych połączeń. Zestawienie najczęściej spotykanych obiektów zawarte jest w Milde, Brenner (2009) oraz Kada (2009). Ostatecznym rezultatem rekonstrukcji jest kształt o najlepszym dopasowaniu do danych wejściowych. Zaletą tej metody jest pełna poprawność topologiczna oraz możliwość zastosowania w przypadku zbiorów o małej gęstości punktów. Podstawową wadą jest natomiast wynikająca z tego podejścia generalizacja, która bardzo często nie wystarcza do opisanie skomplikowanych konstrukcji budynków (Bujakiewicz, Preuss, 2009). Szczegółowe przedstawienie algorytmów należących do tej grupy metod zawarte jest np. w Brenner, Haala (1998) lub też Milde et al. (2008). W drugiej grupie metod, *data driven*, w zbiorze danych wykryte zostają poszczególnych płaszczyzny budynku (w przypadku lotniczego skaningu laserowego są to płaszczyzny dachu). Podstawowym problemem, jaki następnie musi zostać rozwiązany jest detekcja krawędzi przecięć wraz z ich punktami końcowymi. Większość istniejących algorytmów wykorzystuje w tym celu analizę sąsiedztwa wykrytych segmentów (Dorniger, Pfeifer 2008, Sampath, Shan (2010)). Na podstawie tych informacji tworzony jest model mogący przybierać różnorodne, bardzo skomplikowane kształty.

W wyniku dużej rozbieżności między założeniami przyjętymi podczas rekonstrukcji a rzeczywistością, algorytmy pozwalające na w pełni automatyczne i wysoce dokładne modelowanie budynków w oparciu o chmurę punktów są wciąż w fazie rozwoju. Głównym problemem są tutaj niepełne dane – brakujące punkty spowodowane absorpcją sygnału bądź przesłonięciami, nie pozwalające na wykrycie wszystkich połączeń dachowych (Oude Elberink, Vosselman, 2009). Brak tych płaszczyzn powoduje, że zidentyfikowane elementy mają błędnie określone relacje topologiczne skutkujące niepełnym modelem, bądź w ogóle nie przecinają się, tym samym nie pozwalając na automatyczne wyznaczenie krawędzi dachu.

Przedmiotem niniejszej pracy jest w pełni automatyczna metoda budowy trójwymiarowych modeli budynków na poziomie LoD 2 (OGC, 2008), przedstawionych za pomocą linii szkieletowych. Algorytm pozwala na wstawienie brakujących elementów lukarn oraz poprawną rekonstrukcję w sytuacji, gdy płaszczyzny określone jako sąsiednie nie przecinają się (ma to miejsce w przypadku tzw. height jumps, gdy równoległe płaszczyzny połączone są pionową ścianą, od której nie zarejestrowano odbić). Budynki modelowane są na podstawie chmury punktów, bez potrzeby wsparcia w postaci dodatkowych informacji i zbiorów danych. Warunek ten dodatkowo komplikuje zadanie, ponieważ automatyczna rekonstrukcja budynków jedynie na podstawie chmury punktów wciąż pozostaje wyzwaniem w światowych badaniach, lecz z drugiej strony - czyni przedstawiony algorytm dużo bardziej uniwersalnym.

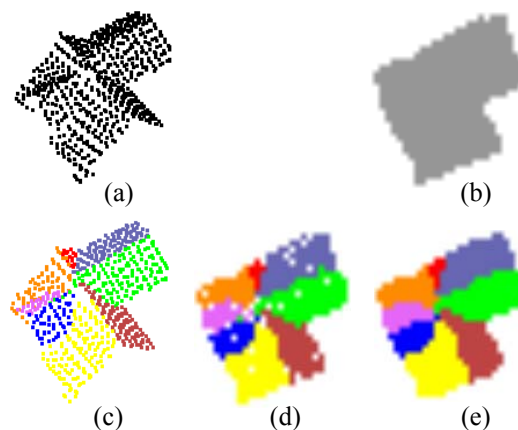
## **2. REKONSTRUKCJA MODELU BUDYNKU**

Przedstawiona metoda generowania modeli zabudowy jest kontynuacją pracy nad autorskimi algorytmami rekonstrukcji budynków na podstawie danych skaningu

laserowego. I tak - danymi wejściowymi dla metody generowania modeli zabudowy jest zbiór punktów przedstawiający dachy budynków, podzielonych na podgrupy, z których każda utożsamia jedną połac dachu bądź zbiór punktów niezakwalifikowanych do żadnej z płaszczyzn. Przedstawienie i omówienie algorytmów segmentacji opisane zostało w pracy Jarząbek, Borkowski (2010). Pierwszym etapem przedstawionego poniżej algorytmu rekonstrukcji jest interpolacja punktów 3D budynku do postaci obrazu rastrowego, na który nałożony zostaje obraz rezultatów segmentacji. Na jego podstawie określone zostają relacje topologiczne między płaszczyznami oraz ich punkty styku (sekcja 2.1). Następnie, na podstawie uzyskanych informacji zrekonstruowany zostaje kontur budynku (2.2). W kolejnym etapie wyznaczone zostają punkty charakterystyczne na obrazie rastrowym (2.3), podobnie jak w podejściu przedstawionym przez Kim, Sham (2011), oraz ich położenie w przestrzeni (2.4), co pozwala w dalszej kolejności na wyznaczenie linii krawędziowych poszczególnych płaszczyzn budynku (2.5).

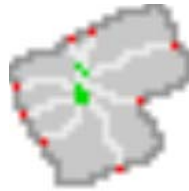
### 2.1. Identyfikacja relacji topologicznych

Punkty przedstawiające budynek w przestrzeni 3D zostają przetworzone do dwuwymiarowego obrazu z rozdzielczością zależną od gęstości danych (szerokość piksela równa jest dwukrotnej średniej odległości między punktami w zbiorze). Następnie na otrzymany obraz binarny nałożony zostaje obraz rezultatów segmentacji budynku na poszczególne płaszczyzny w przestrzeni 3D. W wyniku analizy obydwu rastrów piksele niezakwalifikowane do żadnej z klas otrzymują wartości obliczone na podstawie ich najbliższych sąsiadów. Etap ten pozwala zniwelować pojawiające się na dalszych etapach błędy, wynikające z niekompletnych danych skaningu laserowego, takich jak np. nieprawdziwa topologia bądź nieregularne krawędzie konturów. Interpolację danych ilustruje przykład przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Interpolacja danych. Chmura punktów przedstawiająca dach budynku (a) i jej obraz binarny (b). Dane 3D po segmentacji na płaszczyzny (c), przekształcenie do obrazu (d), uzupełnienie brakujących wartości pikseli, tak aby w pełni pokryły się z obrazem rzutu budynku oraz ich korekta (e)

W odróżnieniu od wielu obecnych w literaturze metod wykorzystujących przetworzone informacje, zastosowanie interpolacji w niniejszej metodzie nie powoduje obniżenia dokładności w porównaniu z oryginalnym zbiorem danych. Upraszcza ono za to kolejny etap rekonstrukcji, jakim jest identyfikacja węzłów styku. Identyfikacja ta oparta jest o analizę relacji topologicznych między poszczególnymi płaszczyznami dachu. Każdemu węzłowi siatki kwadratów (pikseli obrazu segmentacji) zostaje przypisana liczba spotykających się w nim różnych segmentów. Rezultaty analizy przedstawione zostały na rysunku 2.



Rys. 2. Identyfikacja węzłów styku – analiza obrazu segmentacji. W zależności od koloru, zaznaczone węzły są punktami styczności: budynku i otoczenia (ciemnoszary), dwóch płaszczyzn dachu i otoczenia (czerwony), dwóch płaszczyzn (jasnoszary), co najmniej trzech płaszczyzn (zielony)

## 2.2. Rekonstrukcja konturu budynku



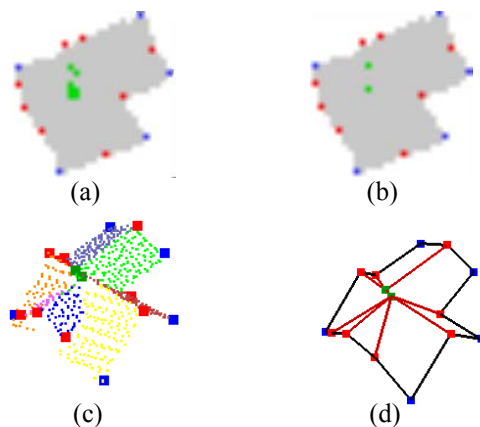
Rys. 3. Detekcja naroży budynku – segmentacja linii. Punkty konturu (a), identyfikacja odcinków prostych (b), łączenie linii (c), punkty narożne (d)

Punkty węzłowe leżące na styku budynku z jego otoczeniem (rys. 3a) stanowią dane wejściowe dla metody pozwalającej zrekonstruować kontur budynku (tożsamy z rzutem dachu). Ponieważ są one zapisane w przypadkowej kolejności, pierwszym etapem jest ich uporządkowanie. W tym celu zaimplementowany został algorytm śledzenia konturu opierający się na sąsiedztwie Moore'a - Moore Neighbor Tracing (Pavlidis, 1982). Określenie topologii pozwala w dalszej kolejności na identyfikację linii prostych. Podczas etapu przygotowania danych każdemu punktowi konturu zostaje przypisane równanie prostej przechodzącej przez ten punkt oraz jego punkty sąsiednie (po jednym z każdej strony). Obliczone parametry stanowią bazowe kryterium dla następnego etapu, którym jest segmentacja linii (Jarząbek-Rychard, Borkowski, 2011). W zależności od różnicy kątów, kolejne punkty konturu podzielone zostają na segmenty (rys. 3a), w które wpasowywana jest prosta. Zaktualizowane parametry segmentów wykorzystane są w kolejnym etapie, którym jest łączenie prostych o podobnej orientacji. Etap ten powtarzany jest iteracyjnie, do

momentu, w którym nie następuje już żadna zmiana (rys. 3b). Ostatecznie, w wyniku przecięć kolejnych linii wyznaczone zostają punkty charakterystyczne budynku znajdujące się na narożach (rys. 3d).

### 2.3. Detekcja punktów charakterystycznych na obrazie rastrowym

Naroża budynku obliczone w poprzednim etapie oraz węzły styku co najmniej trzech płaszczyzn budynku bądź dwóch płaszczyzn i otoczenia stanowią wstępny zbiór punktów charakterystycznych zidentyfikowanych na obrazie rastrowym (rys. 4a, odpowiednio: niebieski, zielony i czerwony kolor). Aby uniknąć detekcji nieistniejących połączeń dachowych, zbiór ten musi zostać poddany redukcji. Punkty leżące blisko siebie zostają zastąpione przez jeden nowy, będący ich średnią arytmetyczną. Punkt ten uważany jest odąd za miejsce styku wszystkich płaszczyzn należących do zastąpionych węzłów. Redukcja punktów przedstawiona jest na rysunku 4ab.



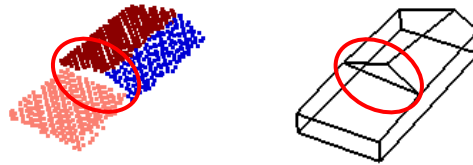
Rys. 4. Punkty charakterystyczne: na obrazie przed (a) i po (b) redukcji, w przestrzeni 3D (c). Linie szkieletowe dachu (d)

### 2.4. Wyznaczanie pozycji 3D punktów charakterystycznych

Początkowo pozycja punktów charakterystycznych w przestrzeni 3D zostaje obliczona dla wszystkich punktów w ten sam sposób, niezależnie od liczby segmentów, które się w nich spotykają. Wysokość punktu determinuje przecięcie umiejscowionej w nim pionowej prostej z odpowiadającą mu płaszczyzną. Następnie, dla wszystkich punktów za wyjątkiem naroży budynków obliczona zostaje dokładna pozycja, której sposób wyznaczenia determinuje liczba segmentów spotykających się w danym punkcie. Jeżeli są to: trzy segmenty - wysokość wyznaczona zostaje z przecięcia odpowiadających im płaszczyzn, więcej niż trzy segmenty – z wyrównania metodą najmniejszych kwadratów, dwa segmenty i otoczenie – z przecięcia dwóch płaszczyzn i płaszczyzny pionowej umiejscowionej w odpowiedniej linii konturu. Jeżeli odległość między dwiema

wysokościami jest mniejsza niż przyjęta wartość progowa, pozycja bazowa punktu zostaje zastąpiona dokładniejszą, wyznaczoną za pomocą przecięcia płaszczyzn (rys. 4c).

Dwa sposoby wyznaczania wysokości punktów mają na celu uniknięcie błędów rekonstrukcji, takich jak niepoprawnie wyznaczone, bądź niemożliwe do wyznaczenia za pomocą przecięć pozycje punktów charakterystycznych, wynikających z występowania pionowych ścian wewnątrz obrysu budynku (height jumps) – przykład na rysunku 5.



Rys. 5. Brak przecięć płaszczyzn spowodowany niekompletnymi danymi oraz poprawne obliczenie pozycji punktów charakterystycznych i wstawienie brakującej ściany

## 2.5. Wyznaczenie linii szkieletowych

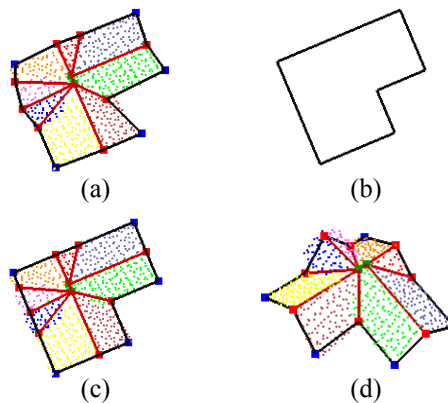
Etap ten składa się z dwóch części: wyznaczenia konturów wszystkich połączeń dachowych oraz ustalenia topologii modelu. Ponieważ naroża płaszczyzn dachu są już zidentyfikowane jako punkty charakterystyczne, do rekonstrukcji konturów wystarczy jedynie określenie ich kolejności. Do tego celu ponownie wykorzystany zostaje obraz rastrowy segmentacji oraz algorytm śledzenia konturu w oparciu o sąsiedztwo Moore'a. Po wyznaczeniu krawędzi połączeń dachowych powtarzające się wspólne linie zostają zredukowane (rezultat przedstawiony na rys. 4d). Ostatecznie, aby możliwe było wyświetlenie modelu zapisane zostają relacje między jego elementami. Model budynku składa się zatem z trzech zbiorów informacji: listy punktów charakterystycznych o określonych współrzędnych  $x, y, z$ , listy linii krawędziowych z informacjami o indeksach punktów końcowych oraz listy płaszczyzn wraz z indeksami otaczających je krawędzi.

## 3. REGULARYZACJA MODELU

Proces ten składa się z trzech etapów, jakimi są: wyrównanie konturu budynku, regularyzacja modelu 3D, oraz wstawienie brakujących elementów. Pierwszy etap przeprowadzony jest w oparciu o linię orientacji (Jarząbek-Rychard, 2012), wyznaczoną z przecięć dwóch największych płaszczyzn dachu. Zależnie od pozycji względem linii orientacji oraz progowej wartości kąta każda z krawędzi konturu określona jest jako równoległa, prostopadła lub dowolna. W przypadku określenia dwóch kolejnych krawędzi jako prostopadłe bądź równoległe, wstawiona zostaje pomiędzy ich końce nowa linia. Ostatecznie, na podstawie typu nadanego krawędziom, kontur zostaje wyrównany z wykorzystaniem warunków wzajemnej prostopadłości i równoległości ścian.

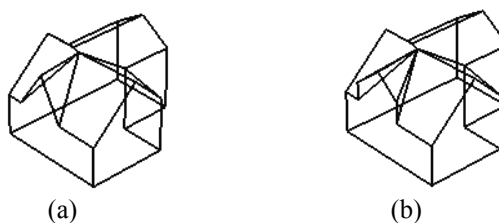
Otrzymane informacje wykorzystane zostają do drugiego etapu wyrównania, jakim jest regularyzacja trójwymiarowego modelu budynku. Na podstawie otrzymanych wcześniej relacji topologicznych, punkty charakterystyczne położone na krawędziach budynku, ale niestanowiące jego narożników (oznaczone w kolorze czerwonym na rys. 6a)

zostają rzutowane na odpowiednie proste wyrównanego konturu (rys. 6b). W wyniku tego procesu punkty otrzymują nowe współrzędne  $x,y$  (rys. 6c). Odpowiadające im nowe wysokości punktów wyznaczone są przez przecięcia sąsiadujących płaszczyzn dachu ze ścianą budynku. Model dachu po regularyzacji przedstawia rys. 6d.



Rys. 6. Regularyzacja modelu. Punkty charakterystyczne i linie krawędziowe przed regularyzacją (rzut na płaszczyznę) (a), wyrównany kontur (b), punkty charakterystyczne i linie krawędziowe po wyrównaniu (rzut na płaszczyznę) (c), w przestrzeni 3D (d)

Celem ostatniego etapu rekonstrukcji jest sprawdzenie poprawności topologicznej budynku i jej korekta poprzez wstawienie brakujących elementów. Są nimi zazwyczaj pionowe ściany lukarn, nieodwzorowane w zbiorze danych lotniczego skaningu laserowego z racji swojego położenia oraz niewielkich rozmiarów. Brak punktów należących do płaszczyzn dachu w oczywisty sposób uniemożliwia ich detekcję. Wynikiem tego jest najczęściej niekompletny model, posiadający luki, bądź model zamknięty, o niepoprawnie wymuszonej topologii (rys. 7a). W celu uniknięcia tego typu błędów sprawdzana jest odległość każdego punktu charakterystycznego od stykających się w nim w rzucie pionowym płaszczyzn dachu. Odległość przekraczająca założoną wartość progową (zależną od stopnia przyjętej generalizacji i gęstości danych) wskazuje na konieczność wstawienia brakującej płaszczyzny. Proces ten odbywa się na podstawie wyznaczonych wcześniej relacji topologicznych (lista powiązanych ze sobą wierzchołków, krawędzi i płaszczyzn). Ostateczny rezultat rekonstrukcji budynku 3D zilustrowany jest na rys. 7b.

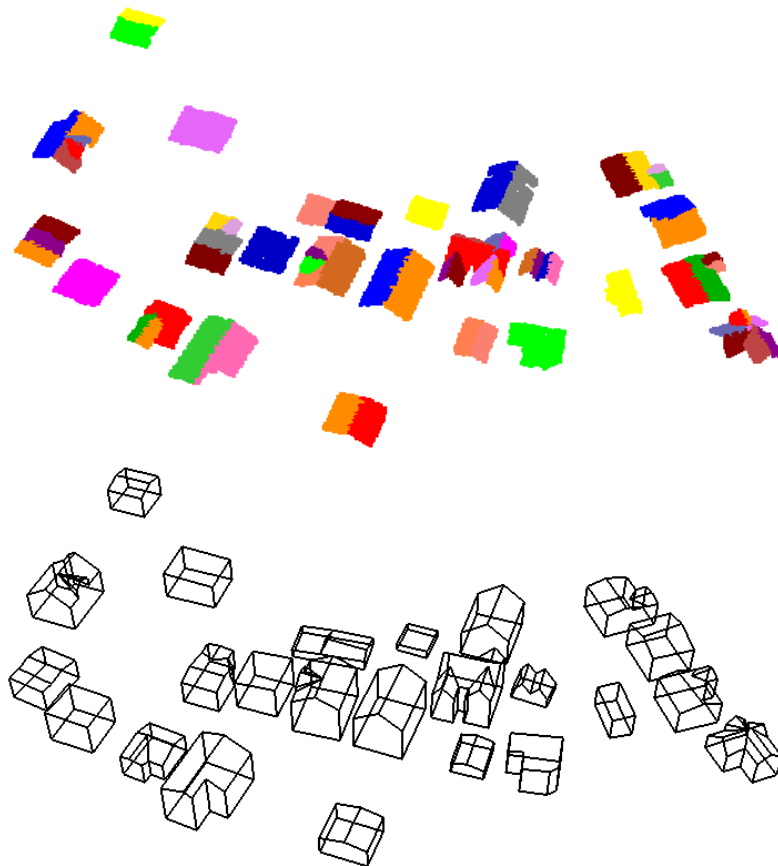


Rys. 7. Model szkieletowy 3D budynku: przed korektą (a), po wstawieniu brakujących płaszczyzn (b)

## 4. TESTY

### 4.1. Dane testowe

Zaprezentowana metoda generowania modeli 3D budynków przetestowana została na danych pozyskanych za pomocą technologii skaningu laserowego z gęstością 4 pkt / m<sup>2</sup>. Obszar testowy o powierzchni 9000 m<sup>2</sup> przedstawia fragment małego miasta obejmujący 24 domy wolnostojące o bardzo zróżnicowanych kształtach dachów. Danymi wejściowymi dla testowania opisaney metody jest zbiór punktów przedstawiających poszczególne budynki podzielone na płaszczyzny.



Rys. 8. Obszar testowy: dane źródłowe oraz zrekonstruowane modele

### 4.2. Uzyskane wyniki

Wizualne porównanie danych wejściowych oraz wygenerowanych automatycznie modeli (rys. 8) pozwala stwierdzić dużą wydajność przedstawionej metody. Wszystkie



budynki zostały zrekonstruowane prawidłowo, niezależnie od stopnia skomplikowania struktury dachu. Zachowana została poprawność topologiczna obiektów - płaszczyzny nie przenikają się i łączą dokładnie w narożnikach. Algorytm jest odporny na problem braku danych w postaci odbić od pionowych ścian o niewielkich rozmiarach, pozwalając na pełną rekonstrukcję wszystkich elementów lukarn. Poprawnie zrekonstruowane zostały także linie nieciągłości wysokości (*height edges*).

Ze względu na cel pracy, jakim jest implementacja algorytmu pozwalającego na rekonstrukcję budynków na podstawie wyłącznie chmury punktów oraz na charakter wykorzystanych danych testowych (pozyskanych za pomocą lotniczego skaningu laserowego) powstaje ograniczenie, którym jest utożsamianie konturu budynku z rzutem jego dachu. Nie jest zatem możliwe zrekonstruowanie okapów i dokładne umiejscowienie przesłoniętych dachem ścian.

## 5. WNIOSKI I PODSUMOWANIE

W artykule zaprezentowana została metoda pozwalająca na automatyczne generowanie trójwymiarowych modeli zabudowy. Zastosowane podejście (*data driven*) bazuje wyłącznie na informacjach zawartych w zbiorze danych, jakim jest chmura punktów pozyskana za pomocą lotniczego skaningu laserowego. Algorytm wykorzystuje na wejściu rezultaty segmentacji, które w kluczowy sposób wpływają na przebieg rekonstrukcji. Dokładność zrekonstruowanego modelu zależy także od gęstości danych, od których uzależnione są wartości zastosowanych w algorytmie parametrów.

Opisana metoda przetestowana została na zbiorze danych przedstawiających budynki o zróżnicowanym stopniu skomplikowania struktury dachu. Przeprowadzone badania wykazują, że algorytm zwraca poprawne topologicznie modele, które prawidłowo odwzorowują rzeczywistość. W dalszej pracy testy te zostaną rozszerzone o szczegółową analizę jakościową.

Budynki zrekonstruowane zostały w formie modeli szkieletowych – każda ściana przedstawiona jest za pomocą linii krawędziowych łączących odpowiednie punkty charakterystyczne obiektu. Ponieważ wierzchołki poszczególnych ścian nie są współpłaszczyznowe, generowanie brył budynków możliwe jest tylko przez triangulację płaszczyzn. Rozwiązanie tego problemu (regularyzacja modelu budynku z zachowaniem współpłaszczyznowości wierzchołków, pozwalająca na generowanie brył złożonych z dowolnych wielokątów) jest przedmiotem prowadzonych aktualnie badań.

## Podziękowania

Autorka pragnie podziękować firmie Integrated Management Services Sp. z o.o. z Wrocławia za udostępnienie danych testowych.



Zadanie współfinansowane przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

## 6. LITERATURA

- Brenner, C., 2005. Building reconstruction from images and laser scanning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6 (3–4), pp. 187–198.
- Brenner, C., Haala, N., 1998. Rapid acquisition of virtual reality city models from multiple data sources. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 32 (Part 5), pp. 323–330.
- Bujakiewicz, A., Preuss R., 2009. Ocena możliwości automatycznej rekonstrukcji 3D modeli budynków z danych fotogrametrycznych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 19
- Dorniger P., Pfeifer N., 2008. A comprehensive automated 3D approach for building extraction, reconstruction and regularization from air borne laser scanning point cloud. *Sensors*, vol. 8, pp. 7323-7343.
- Jarząbek-Rychard M., 2012. Reconstruction of building outlines in dense urban areas based on LiDAR data and address points. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXIX-B3), pp. 121–126.
- Jarząbek-Rychard M., Borkowski A., 2011. Building outline reconstruction from ALS data set with a priori information. *Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing*, Vol. 22, 2011, pp. 227-236.
- Jarząbek-Rychard M., Borkowski A., 2010. Porównanie algorytmów RANSAC oraz rosnących płaszczyzn w procesie sementacji danych lotniczego skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 21, 2010, s. 119–129.
- 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).
- Milde, J., Zhang, Y., Brenner, C., Plümer, L., Sester, M., 2008. Building reconstruction using a structural description based on a formal grammar. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 37 (Part B3b), 227–232.
- Kada, M., 2009. The 3D Berlin project. Fritsch, D. (Ed.), *Photogrammetric Week 2009*. Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 331–340.
- Kim, K., Shan, J., 2011. Building roof modeling from airborne laser scanning data based on level set approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66, pp.484-497.
- Novacheva, A., 2008. Building roof reconstruction from LiDAR data and aerial images through plane extraction and colour edge detection. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 37, Part B6, pp. 53–57.
- Open Geospatial Consortium, 2008. OpenGIS® City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard.
- Oude Elberink, S., Vosselman, G., 2009. Building reconstruction by target based graph matching on incomplete laser data: analysis and limitations. *Sensors* 9, pp. 6101–6118.
- Pavlidis, T., 1982. Algorithms for Graphics and Image Processing, *Computer Science Press*, Rockville, Maryland
- Sampath, A., Shan, J., 2010. Segmentation and reconstruction of polyhedral building roofs from aerial LiDAR point clouds. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 48 (3), pp. 1554 -1567.

## **AUTOMATIC RECONSTRUCTION OF 3D BUILDING SKELETON MODELS BASED ON AIRBORNE LASER SCANNING DATA**

KEY WORDS: 3D building modeling, LiDAR, ALS, point cloud, roof topology

### **Summary**

This paper presents a fully automatic method for generation of 3D building skeleton models. Objects are reconstructed from point clouds, without the need for a support, like additional information and data sets. This condition makes the reconstruction task even more complicated, however at the same time, presented algorithm becomes much more versatile. Topological model of a building is created based on characteristic points, which determine intersections of adjacent planes of the roof or walls. The characteristic points located on the outer edges of a building are extracted using author's contour detecting algorithm. In the next stage of reconstruction topological relations between the points are defined, which allow to detect contour lines of individual planes of a building. Finally, adjustment of vertex points and edge lines is performed that enables to obtain regularized building model. The algorithm was tested against airborne laser scanning data set that shows a part of the small town. As a result of experiments it can be concluded that the described method allows the correct generation of skeletal building models with a complex structure.



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



**DOLNY  
ŚLĄSK**

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



The task is co-financed by the European Union as part of the European Social Fund.

Dane autora:

Mgr inż. Małgorzata Jarzabek-Rychard  
e-mail: [malgorzata.jarzabek-rychard@up.wroc.pl](mailto:malgorzata.jarzabek-rychard@up.wroc.pl)  
telefon: 71 320 19 52