

## **ANALIZA DOKŁADNOŚCI MODELOWANIA 3D BUDYNKÓW W OPARCIU O DANE Z LOTNICZEGO SKANOWANIA LASEROWEGO**

### **ANALYSIS OF 3D MODELLING ACCURACY BASED ON POINT CLOUDS FROM AIRBORNE LASER SCANNING**

**Magdalena Pilarska, Wojciech Ostrowski, Krzysztof Bakula**

Zakład Fotogrametrii, Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej,  
Wydział Geodezji i Kartografii, Politechnika Warszawska

**SŁOWA KLUCZOWE:** modelowanie budynków, ALS, CityGML, LOD2, analiza dokładności, CAPAP

**STRESZCZENIE** Modelowanie budynków w dużej skali (miasto, kraj) jest trendem obserwowanym w wielu krajach. Modele budynków można tworzyć m.in. na podstawie danych z lotniczego skanowania laserowego oraz ze zdjęć lotniczych. Coraz więcej wagi przykłada się również do dokładności modeli 3D budynków. W artykule przedstawiona została analiza dokładności modeli budynków w oparciu o chmury punktów z lotniczego skanowania laserowego. Metodyka przedstawiona w artykule opiera się na wymaganiach odnośnie kontroli zaproponowanej w ramach projektu CAPAP. Wybrane zostały 3 obszary testowe, dla których dla każdej połaci dachów budynków obliczone zostały parametry statystyczne (odchylenie standardowe odległości punktów od płaszczyzny połaci, wartość średniej odległości między chmurą punktów a płaszczyzną dachu, błąd średni kwadratowy odległości - RMSE). Według przyjętego progu dokładności 1 m błędu RMSE dla obszaru 1: 1.04% połaci nie spełniło postawionego kryterium, dla obszaru 2: 0.63%, a dla obszaru 3: 12.63%. W drugiej części artykułu zaprezentowana została bardziej szczegółowa analiza modeli budynków. Dla połaci dachów wybranych modeli wygenerowane i poddane analizie zostały histogramy, które przedstawiają rozkład wartości różnic odległości normalnych punktów chmury od zamodelowanej płaszczyzny dachu. Metodyka analizy dachów modeli budynków na podstawie histogramów umożliwia nie tylko ocenę, czy dana płaszczyzna spełnia wymagania dokładności standardu LOD2, ale również, w jakim stopniu została ona poddana generalizacji.

## **1. WPROWADZENIE**

Modelowanie budynków w skali miasta czy też w skali całego kraju, jest trendem obserwowanym w wielu europejskich krajach, dlatego też temat ten nieustannie pozostaje w kręgu zainteresowań zarówno narodowych agencji odpowiedzialnych za dane przestrzenne, jak i poszczególnych władz lokalnych (miast i jednostek podziału terytorialnego). Zagadnień podlegających analizie przy planowaniu, wykonywaniu i kontroli modeli 3D nie sposób wyczerpać w jednym artykule. Kwestiami poszczególnych opracowań

są tematy takie jak: możliwe źródła danych do modelowania 3D, metodyka tworzenia samych modeli, niejednokrotnie związana bezpośrednio z danymi, możliwy do uzyskania stopień szczegółowości, czy wreszcie sam standard zapisu modeli 3D. Obecnie najbardziej popularnym standardem modeli 3D stał się schemat aplikacyjny CityGML (Kolbe *et al.*, 2005). W odniesieniu do modeli budynków (gdź standard ten odnosi się do modelowania całego krajobrazu) wyróżnia się w nim przede wszystkim poziomy szczegółowości (ang. *level of details* - LOD; Biljecki *et al.*, 2016a). Poziomy te pojawiać się mogą w wielu wariantach, a sam standard jest nieustannie rozbudowywany (Biljecki *et al.*, 2016b).

Rozwijane od kilku dekad lotnicze skanowanie laserowe (ang. ALS - *airborne laser scanning*), a w Polsce obecne w skali całego kraju od czasu realizacji projektu ISOK (Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami) jest obecnie najpopularniejszym źródłem danych do modelowania 3D. Dane te ze swoją dokładnością na poziomie decymetrowym są źródłem najdokładniejszej informacji wysokościowej o terenie i jego pokryciu, możliwej do pozyskania w skali miasta lub większej (Kurczyński i Bakula, 2013). Odzwierciedlenie ich wykorzystania można znaleźć w pracach naukowych z zakresu analizy przydatności tego typu danych w kraju (Cisło-Lesicka *et al.*, 2014), jak i pracach, w których tworzone są metodyki wykorzystujące chmury punktów ALS w modelowaniu 3D (Jarząbek-Rychard, 2012; Marjasiewicz i Malej, 2014).

W literaturze przedstawione zostały różne podejścia wykrywania oraz modelowania budynków z lotniczego skanowania laserowego (Kada i McKinley, 2009; Sampath i Shan, 2010; Sun i Salvaggio, 2013; Verma *et al.*, 2006). Niektóre z metod opierają się na integracji chmur punktów z ALS ze zdjęciami lotniczymi w celu zwiększenia dokładności geometrycznej modeli (Rottensteiner i Briese, 2003). Modelowanie budynków z danych z lotniczego skanowania laserowego nie należy do łatwych zagadnień, co związane jest z kilkoma czynnikami. Poprawne modelowanie budynków możliwe jest tylko, gdy gęstość punktów jest wystarczająca - co najmniej 3-4 punkty na m<sup>2</sup> (Forlani *et al.*, 2006), co biorąc pod uwagę obecny poziom technologiczny nie jest trudne do osiągnięcia. Duża różnica w gęstości chmury punktów może okazać się przeszkodą w poprawnym wykryciu płaszczyzny dachu (Tarsha-Kurdi *et al.*, 2007). Jeśli przy modelowaniu wykorzystywana jest sklasyfikowana chmura punktów, wówczas istotna staje się dokładność klasyfikacji. Punkty, które nie są odbiciem wiązki od budynków, a przypisane zostały do klasy "budynki", wpływają na dokładność wyznaczenia płaszczyzny dachu. Ponadto, dla niskich budynków, które znajdują się w sąsiedztwie wysokiej roślinności mogą wystąpić problemy z określeniem krawędzi połączy dachu. W takich przypadkach pomocne mogą okazać się przyziemia budynków, jednakże nawet w przypadku wykorzystania tej dodatkowej informacji, w związku z niewystarczającą gęstością punktów problematyczne może okazać się poprawne odtworzenie kształtu dachu. Przeszkodą w automatycznym tworzeniu modeli mogą się okazać skomplikowane kształty dachów, np. dachy wielospadowe, dla których mogą wystąpić trudności w lokalizacji kalenicy dachu oraz określeniu nachylenia płaszczyzny dachu (Forlani *et al.*, 2006). Chmura punktów pochodząca z ALS charakteryzuje się pewną dokładnością, zarówno sytuacyjną, jak i wysokościową. Zarówno nieodfiltrowane szumy, jak i detale znajdujące się na połaciach dachów mogą obniżyć dokładność rekonstrukcji kształtu dachu (Tarsha-Kurdi, 2008).

Przed tymi i innymi problemami stanęli inicjatorzy projektu Centrum Analiz Przestrzennych Administracji Publicznej (CAPAP) realizowanego obecnie przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii, mającego na celu zwiększenie stopnia wykorzystania danych

przestrzennych przez obywateli, przedsiębiorców i administrację publiczną. Jednym z zadań, które realizowane jest w ramach projektu, jest pozyskanie modeli 3D budynków dla całego kraju. Wyzwanie to obejmuje ponad 15 milionów budynków o szczegółowości LOD2 na podstawie danych ALS oraz przyziemi budynków z bazy danych obiektów topograficznych BDOT10K. Zamówienie polega w szczególności na przeprowadzaniu weryfikacji ilościowej (m.in. sprawdzeniu liczby plików CityGML oraz produktów 3D przekazanych przez wykonawcę) oraz jakościowej (m.in. kontroli zgodności plików CityGML ze schematem XSD - GUGIK, 2017). Szczegółowej kontroli modeli 3D, podlegać będzie minimum 0.25% (ale nie mniej niż 100 w każdym pliku) losowych, równomiernie rozmieszczonych budynków. Kontrola w takiej formie dobrze sprawdziła się przy realizacji innych projektów. Nie mniej jednak poza pewnymi elementami, które można zautomatyzować, jest ona ciężka do przeprowadzenia w pełni automatycznie. Kontrola w tym przypadku bazuje głównie na wytworzonych płaszczyznach referencyjnych. Nie jest to jedyne podejście. W kilku inicjatywach samorządowych zakończonych lub obecnie realizowanych znaleźć można różne formy kontroli modeli 3D, np. porównanie wysokości budynków z istniejącą bazą lub pomiarem. Nawet bardziej skomplikowane podejścia nie implementują jednak zazwyczaj metod automatycznych. Kontrola modeli 3D może opierać się na różnych danych. Poza wygenerowanymi płaszczyznami referencyjnymi może bazować także na numerycznym modelu pokrycia terenu czy samej chmurze punktów. W Li *et al.* (2013) przedstawiona została metodyka oceny jakości segmentacji RANSAC budynków, w której ocenie podlegała poprawność wyróżniania kalenic budynków oraz segmentacji budynków. W Wentz i Zhao (2015) wykorzystana została analiza pikselowa oraz obiektowa w celu określenia dokładności wysokościowej i sytuacyjnej modeli budynków.

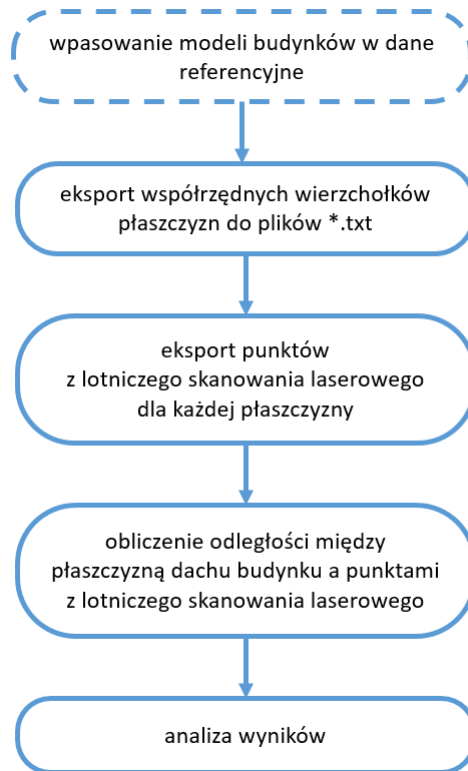
W artykule zaprezentowano możliwości automatycznej kontroli modeli 3D w podejściu bazującym na sklasyfikowanej chmurze punktów ALS poprzez wykorzystanie statystycznych parametrów rozkładu odległości normalnej chmury punktów od wytworzonych płaszczyzn modelu 3D. W kolejnych rozdziałach zaprezentowano zaproponowaną metodykę kontroli oraz jej wyniki dla zbiorów budynków na trzech obszarach testowych oraz interpretacji i dalszych rozważań na poszczególnych, wybranych budynkach.

## **2. ANALIZA MODELI 3D BUDYNKÓW NA POZIOMIE LOD2 NA PODSTAWIE DANYCH Z LOTNICZEGO SKANOWANIA LASEROWEGO**

Proponowany ciąg technologiczny oceny modeli budynków 3D jest trzystopniowy i zobrazowany został na rysunku 1. Obejmuje on:

1. Wpasowanie modeli budynków w dane referencyjne według metodyki zaproponowanej przez Akca *et al.* (2010);
2. Ocena poszczególnych płaszczyzn z wykorzystaniem odległości normalnych, modyfikacja metodyki zaproponowanej przez Oude Elberink i Vosselman (2011);
3. Szczegółowa analiza parametrów statystycznych w zbiorach utworzonych budynków oraz histogramów dla poszczególnych płaszczyzn tworzonych modeli.

W artykule analizy przeprowadzono dla dwóch z trzech opisanych w metodyce etapów. Pominięto pierwszą część, która służy usunięciu błędów systematycznych XY pomiędzy modelem a danymi, gdyż takich błędów w tych przypadkach nie zanotowano.



Rys. 1. Schemat przedstawiający przebieg analizy dokładności modeli budynków na podstawie danych z lotniczego skaningu laserowego (pierwszy etap został pominięty ze względu na brak błędów w położeniu sytuacyjnym)

Fig. 1. Diagram showing the workflow of accuracy analysis for building models based on the ALS data (the first stage was omitted because of lack of position errors)

### 3. EKSPERYMENT

W ramach eksperymentu wykonano testy dokładności modelowania dla trzech obszarów wybranych fragmentów dzielnicy Ochota oraz przeprowadzono szczegółową analizę dla wybranych budynków. Przy określaniu oczekiwanej dokładności modeli autorzy opierali się na metodyce kontroli zaproponowanej w ramach projektu CAPAP.

#### 3.1. Obszar i dane testowe

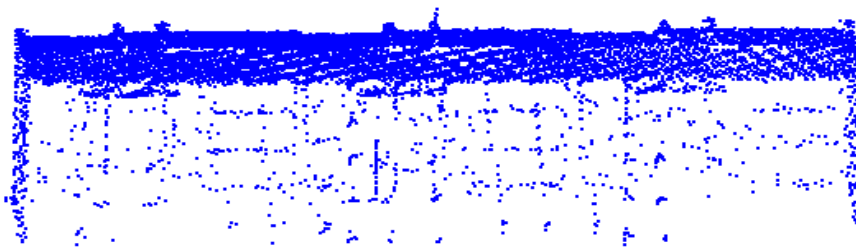
Wybrane obszary testowe to fragmenty obszaru dzielnicy Ochota. Jako dane źródłowe do modelowania budynków posłużyły dane z lotniczego skanowania laserowego, pozyskane w ramach projektu ISOK oraz przyziemia budynków z bazy BDOT10k. Gęstość danych dla obszarów płaskich wynosiła 12 p./m<sup>2</sup>. W przypadku obszarów podwójnego pokrycia, gęstość

punktów wzrastała dwukrotnie. Modele budynków zostały wykonane w programie Terrasolid. Do analizy dokładności wybrane zostały 3 obszary, które modelowane były przez trzech obserwatorów (rys. 2).



Rys. 2. Obszary testowe wybrane do analizy dokładności  
Fig. 2. Test areas which were selected for the accuracy analysis

Do analizy dokładności modeli budynków brane pod uwagę były punkty, które należały do klasy budynki. Odbicia zarejestrowane na ścianach również zakwalifikowane zostały do klasy budynki (rys. 3) i musiały zostać odfiltrowane ze względu na ich duży wpływ na analizę dokładności.



Rys. 3. Przykład obiektu z klasy "budynki" - odbicia zarejestrowane na ścianach były odfiltrowane ze względu na duży wpływ na wyniki analizy dokładności  
Fig. 3. Example of object from class "building" - echoes registered on walls, which were removed because of high influence on the results of the accuracy analysis

### **3.2. Założone progi dokładności**

Przy określaniu oczekiwanych progów dokładności bazowano na wymaganiach projektu CAPAP. Zamawiający określił w Szczegółowym Opisie Przedmiotu Zamówienia

graniczne warunki w odniesieniu do dokładności modeli 3D budynków względem danych ALS, które przedstawiają się następująco (GUGIK, 2017):

1. minimalna odległość od dowolnego punktu poligonu (połaci dachu) modelu 3D budynku, do odpowiadającej temu poligonowi płaszczyzny utworzonej na punktach z danych ALS, która ma nie przekraczać wartości 1 m (dopuszcza się przekroczenie tej wartości o nie więcej niż 20% dla 5% liczby modeli 3D budynków skontrolowanych w ramach próbki);
2. różnica nachylenia połaci dachu modelu 3D budynku, w stosunku do odpowiadającej mu płaszczyzny utworzonej na punktach z danych ALS nie powinna przekraczać 5 stopni (dopuszcza się przekroczenie tej wartości o nie więcej niż 20% dla 5% liczby modeli 3D budynków skontrolowanych w ramach próbki);
3. maksymalna różnica między wysokością modelu 3D budynku, a maksymalną wysokością budynku zmierzoną na podstawie danych ALS, która nie będzie przekraczać 1 m (dopuszcza się przekroczenie tej wartości o nie więcej niż 20% dla 5% liczby Modeli 3D budynków skontrolowanych w ramach próbki).

W artykule skupiono się na pierwszej analizie, tj. analizie odległości normalnych punktów od płaszczyzny dachu. W tym celu obliczone zostały wartości: średniej odległości i odchylenia standardowego oraz średniej kwadratowej odległości (RMSE). W analizie dokładności przyjęto próg 1 m.

Odnosząc się do analizy wyników kontroli poprawności i dokładności modeli 3D budynków, w przyjętej metodyce policzono dla obiektów testowych następujące parametry statystyczne:

- średnia wartość odchylenia standardowego odległości punktów od płaszczyzny połaci modelu dla zbioru analizowanych budynków ( $\sigma$  - miara rozrzutu rozmieszczenia punktów dachu budynków względem płaszczyzny połaci stworzonego modelu);
- średnia wartość średniej odległości dla analizowanych budynków ( $d$  - miara systematycznego przesunięcia po odległości normalnej połaci stworzonego modelu względem chmury punktów dachu budynku);
- błędu średniego kwadratowego odległości (RMSE) liczonego na podstawie odległości normalnej punktów od płaszczyzny;
- procent liczby połaci, dla których wartość odchylenia standardowego odległości punktów od płaszczyzny połaci przekroczyła 1m;
- procent liczby połaci, dla których średnia odległość normalna punktów od płaszczyzny połaci przekroczyła 1m;
- procent liczby połaci, dla których RMSE połaci przekroczył 1m;
- procent liczby połaci, dla których RMSE połaci przekroczył 1.20 m (kryterium akceptowalnego obniżenia dokładności o 20% analogicznie jak w CAPAP).

### 3.3. Analiza dokładności dla wybranego fragmentu modelu 3D dzielnicy Ochota

Przed analizą dokładności modeli należało odfiltrować punkty znajdujące się na ścianach budynków. Różnicę w wynikach przed i po zastosowaniu filtracji dla obszaru testowego nr 3 zaprezentowano w tabeli 1.

Dla każdego z wybranych obszarów testowych została zastosowana metodyka zgodna z rysunkiem 1. W tabeli 2 przedstawione zostały statystyki dla obszarów testowych.

Tab. 1 Różnica w wartościach odchylenia standardowego, wartości RMSE i średniej odległości punktu od płaszczyzny dachu dla obszaru testowego nr 3 (372 połacie dachu)

Tab. 1 Differences in standard deviation, RMSE and mean distance between the ALS points and roof surface for test area No 3.

przed filtracją		liczba połaci, dla których:		po filtracji		liczba połaci, dla których:	
$d_{\text{sr}}$ [m]	RMSE <sub>sr</sub> [m]	$ d_{\text{sr}}  > 1$ m	RMSE <sub>sr</sub> > 1 m	$d_{\text{sr}}$ [m]	RMSE <sub>sr</sub> [m]	$ d_{\text{sr}}  > 1$ m	RMSE <sub>sr</sub> > 1 m
- 0.012	1.128	58	265	0.002	0.194	4	8
	%	7.52	34.37		%	0.52	1.04

Tab. 2 Statystyki wybranych obszarów testowych

Tab. 2 Statistics for selected test areas

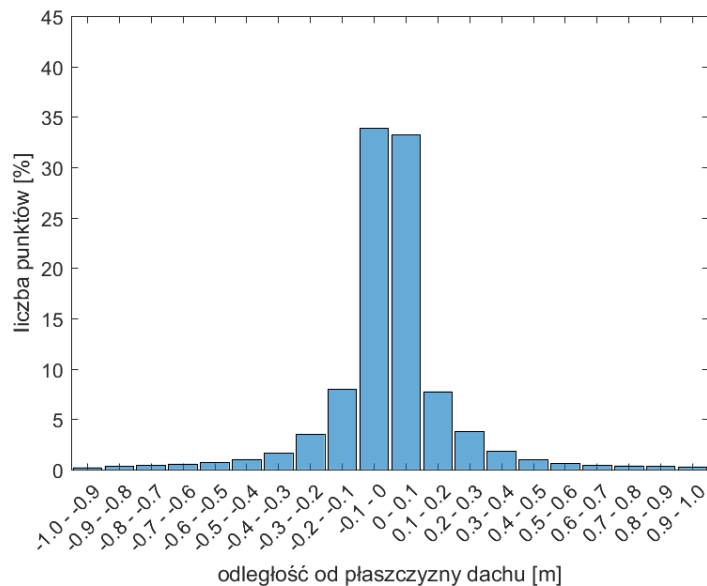
	Obszar 1	Obszar 2	Obszar 3
liczba połaci	771	630	372
liczba zarejestrowanych punktów	923677	1328225	1302700
liczba punktów, dla których odległość >20 cm	18.28% (242856)	7.01% (64730)	23.11% (301008)
liczba punktów, dla których odległość >50 cm	4.27% (56781)	2.35% (21709)	6.50% (84617)

Na podstawie Tabeli 2 widać, że obszary różniły się między sobą liczbą połaci jak i liczbą punktów przypadającą na jedną połacie. Ponadto liczby punktów, dla których odległości przekraczała wartość 20 cm i 50 cm różnią się od siebie znacząco. Najmniej takich punktów znajduje się na obszarze 2, a najwięcej: na obszarze 3. Powyższa tabela uzasadnia podzielenie obszaru fragmentu dzielnicy Ochota na 3 oddzielne obszary pomimo ich sąsiedztwa. Obszary te reprezentują bowiem różne typy i stopień skomplikowania budynków.

Dla każdego z obszarów testowych przedstawiono w postaci tabel wyniki analizy dokładności wysokościowej modeli budynków. Zgodnie z przyjętym progiem dokładności 1 m, dla obszaru 1 średnia odległość była przekroczona dla 4 połaci, a RMSE: dla 8 (Tabela 3). Zgodnie z przyjętymi założeniami obszar spełnia założone w eksperymencie dokładności. Na rysunku 4 przedstawiony został procentowy rozkład odległości punktów od płaszczyzny dachów. Widać, że rozkład ten oscyluje wokół 0.

Tab. 3 Wyniki analizy dokładności budynków (połaci) dla obszaru 1  
 Tab. 3 Analysis results of buildings (roof planes) for area 1

Obszar 1				Liczba połaci, dla których:			
	$\sigma_{\text{śr}}$ [m]	$d_{\text{śr}}$ [m]	RMSE $_{\text{śr}}$ [m]		$\sigma_{\text{śr}} > 1\text{ m}$	$ d_{\text{śr}}  > 1\text{ m}$	RMSE $_{\text{śr}} > 1\text{ m}$
średnia	0.176	0.002	0.194	lb. połaci	0	4	8
min	0.000	-1.097	0.028	% połaci	0.00 %	0.52 %	1.04 %
max	0.817	1.038	1.191	% połaci z tol. +20%	0.00%	0.00%	0.00%



Rys. 4. Procentowy rozkład odległości punktów chmury ALS od wymodelowanej płaszczyzny dachów dla obszaru 1

Fig. 4. Percentage distribution of ALS point cloud distance from modelled building plane for area 1

Wyniki dla obszaru 2 przedstawiono w tabeli 4. Dla 4 połaci została przekroczona wartość 1 m dla błędu RMSE, a średnia odległość: dla 2. Na rysunku 6 przedstawiony został procentowy rozkład odległości punktów od płaszczyzny dachów. Ten obszar, podobnie jak obszar 1, pozytywnie przeszedł kontrolę dokładności.



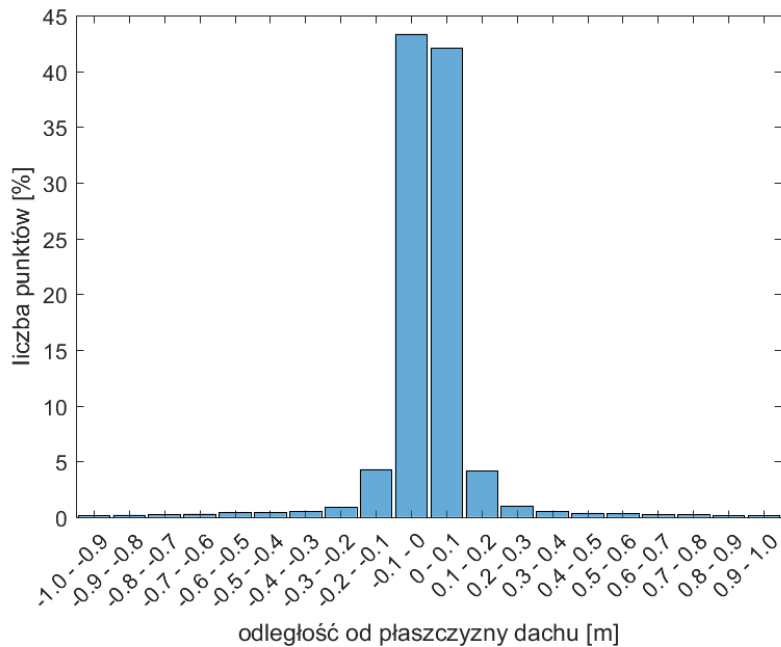


Rys. 5. Rozkład połaci spełniających i niespełniających kryterium średniej odległości 1 m na obszarze 1

Fig. 5. Distribution of roof surfaces which fulfill and do not fulfill the criterion of mean distance of 1 m on the area 1

Tab. 4 Wyniki analizy dokładności budynków (połaci) dla obszaru 2  
 Tab. 4 Analysis results of buildings (roof planes) for area 2

Obszar 2				Liczba połaci, dla których:			
	$\sigma_{sr}$ [m]	$d_{sr}$ [m]	$RMSE_{sr}$ [m]		$\sigma_{sr} > 1m$	$ d_{sr}  > 1m$	$RMSE_{sr} > 1m$
średnia	0.162	0.000	0.173	lb. połaci	0	2	4
min	0.034	-0.938	0.034	% połaci	0.00%	0.32%	0.63%
max	0.688	1.029	1.205	% połaci z tol. +20%	0.00%	0.00%	0.16%



Rys. 6. Procentowy rozkład odległości punktów chmury ALS od wymodelowanej płaszczyzny dachów obszaru 2

Fig. 6. Percentage distribution of ALS point cloud distance from modelled building plane for area 2

Wyniki dla obszaru 3 odbiegają nieznacznie od wyników dla obszaru 1 i 2. Na podstawie tabeli 5 można zauważyć, że dla 39 połaci przekroczona została wartość 1 m średniej odległości, a wartość błędu RMSE: dla 47 połaci dachów tego obszaru. Na rysunku 8 przedstawiającym procentowy rozkład odległości punktów widać jednak, że znaczna liczba punktów znajduje się w przedziale odległości od -0.2 do 0.2 m. Na rysunku 9 widoczne jest że zdecydowana większość błędów (35) związana jest ze świetlikami na dachach bloków, co może być związane z generalizacją tychże elementów. Bazując na warunkach określonych w metodyce kontroli modeli w ramach projektu CAPAP, obszar ten nie przeszedłby pozytywnie kontroli, ponieważ dla więcej niż 5% liczby modeli 3D budynków przekroczona została wartość RMSE o 20% dopuszczalnej wartości 1 m.

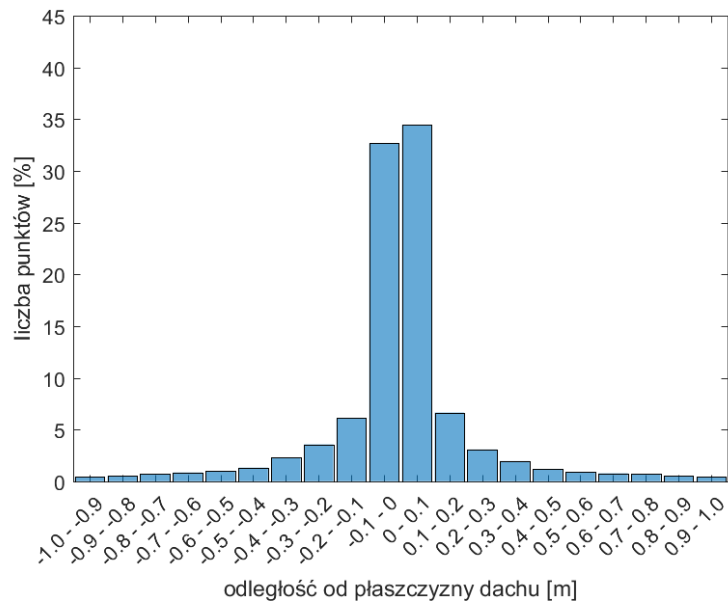


Rys. 7. Rozkład połaci spełniających i niespełniających kryterium średniej odległości 1 m na obszarze 2

Fig. 7. Distribution of roof surfaces which fulfill and do not fulfill the criterion of mean distance of 1 m on the area 2

Tab. 5 Wyniki analizy dokładności budynków (połaci) dla obszaru 3  
 Tab. 5 Analysis results of buildings (roof planes) for area 3

Obszar 3				Liczba połaci, dla których:			
	$\sigma_{sr}$ [m]	$d_{sr}$ [m]	$RMSE_{sr}$ [m]		$\sigma_{sr} > 1m$	$ d_{sr}  > 1 m$	$RMSE_{sr} > 1 m$
średnia	0.294	0.008	0.422	lb. połaci	4	39	47
min	0.023	-1.898	0.037	% połaci	1.08%	10.48%	12.63%
max	1.189	1.977	1.977	% połaci z tol. +20%	0.00%	8.87%	9.95%



Rys. 8. Procentowy rozkład odległości punktów chmury ALS od wymodelowanej płaszczyzny dachów dla obszaru 3

Fig. 8. Percentage distribution of ALS point cloud distance from modelled building plane for area 3

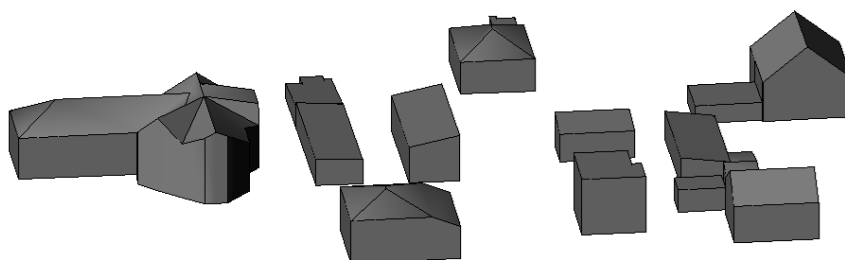


Rys. 9. Rozkład połaci spełniających i niespełniających kryterium średniej odległości 1 m na obszarze 3.

Fig. 9. Distribution of roof surfaces which fulfill and do not fulfill the criterion of mean distance of 1 m on the area 3.

### 3.4. Analiza poszczególnych modeli budynków

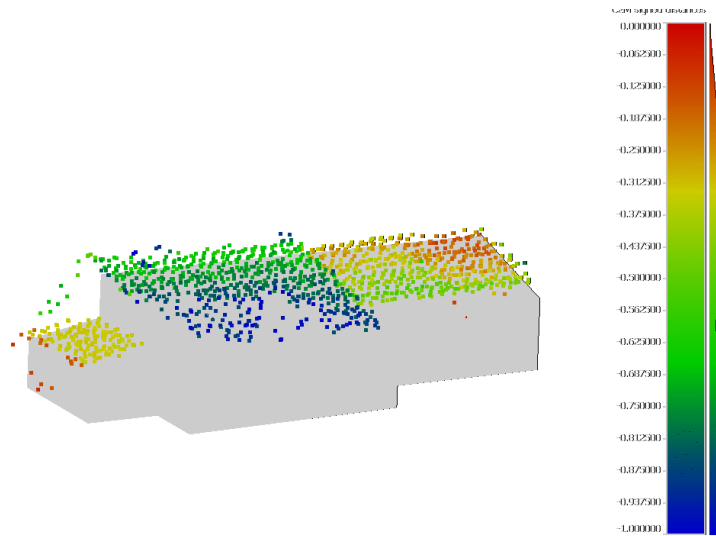
Kolejny, bardziej szczegółowy etap analizy polega na wygenerowaniu i analizie histogramów, które przedstawiają rozkład wartości różnic odległości normalnych punktów chmury ALS od wymodelowanej płaszczyzny dachu. Szczegółowe analizy przeprowadzono dla kilku wybranych modeli budynków o zróżnicowanych kształtach dachów (rys. 10). Ponadto, pokazane zostały przekroje przez połacie dachów wraz z punktami z lotniczego skanowania laserowego. Dla każdej z połaci dachu obliczone i przeanalizowane zostały odległości między płaszczyzną dachu pochodzącą z modelu i danymi z ALS. Opisane analizy wykonane zostały w programie Matlab.



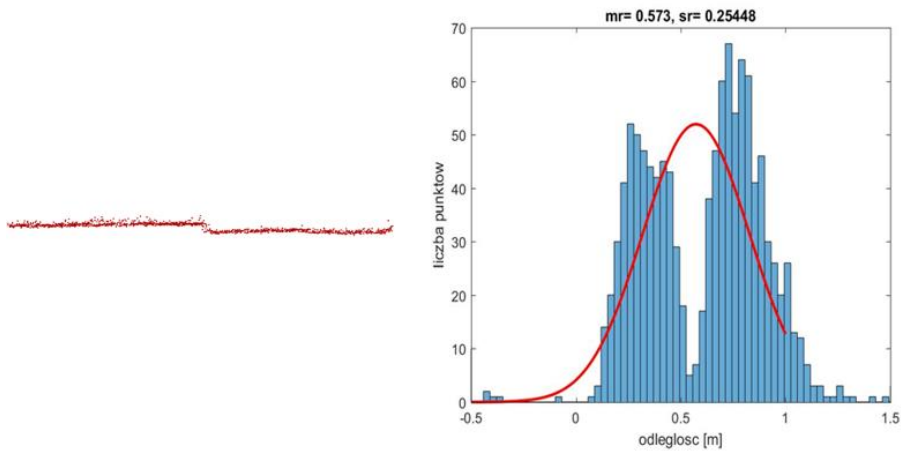
Rys. 10. Modele budynków wybrane do szczegółowej analizy dokładności  
Fig. 10. Building models chosen to more detailed analysis

Wśród modeli budynków, które wybrane zostały do szczegółowej analizy dokładności, znalazło się kilka wartych uwagi przykładów. Pierwszy z nich to budynek z dachem jednospadowym, który przedstawiony został za pomocą jednej płaszczyzny (rys. 11). Po obliczeniu różnic między płaszczyzną dachu i chmurą punktów widać, że na rozkładzie różnic odległości na histogramie można wyróżnić dwa maksima (rys. 12). Na przekroju na rysunku 12 pokazana została różnica w wysokości między dwoma fragmentami dachu.

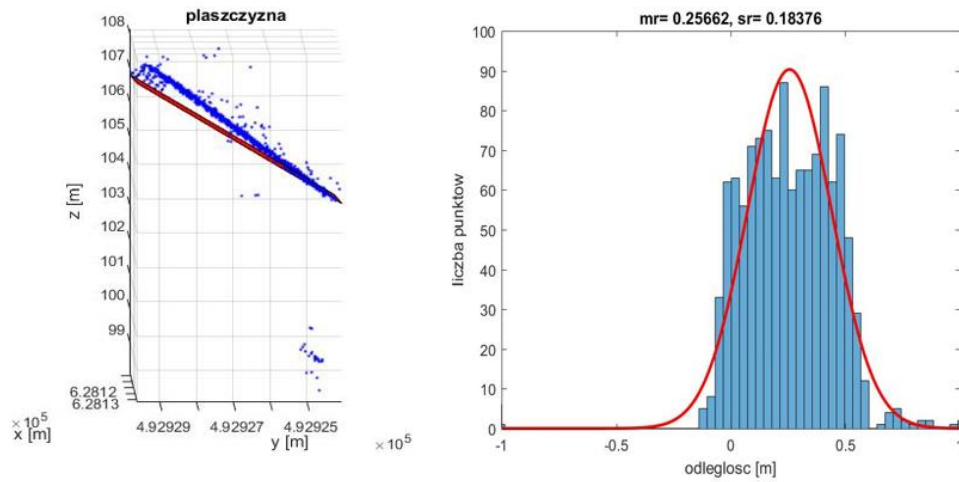
W analizie szczegółowej znalezionych zostało kilka przykładów połaci, których płaszczyzny odbiegały od rozkładu punktów z ALS. Na rysunku 13 przedstawiony został przykład płaszczyzny dachu, dla której różnica odległości między punktami z ALS rośnie wraz ze wysokością budynku, co związane jest z błędnym kątem nachylenia połaci dachu. Na histogramie widać, że rozkład wartości różnic bliski jest rozkładowi jednostajnemu.



Rys. 11. Model budynku, którego dwie połacie o różnych wysokościach zostały przedstawione na modelu jako jedna płaszczyzna  
Fig. 11. Model of a building, for which two roof surfaces with different height were presented as one roof Surface

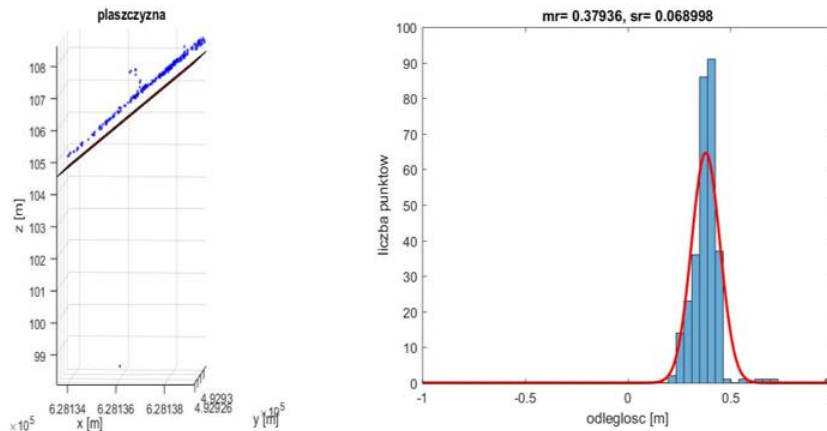


Rys. 12. Przykład dachu budynku (przekrój i histogram odległości chmury ALS od modelowanej powierzchni dachu), którego dwie połacie o różnych wysokościach zostały przedstawione na modelu jako jedna płaszczyzna  
Fig. 12. Example of roof (cross section and histogram of average distance between ALS point cloud and modelled roof plane) with two surfaces with different height, which were presented on the building model as one surface



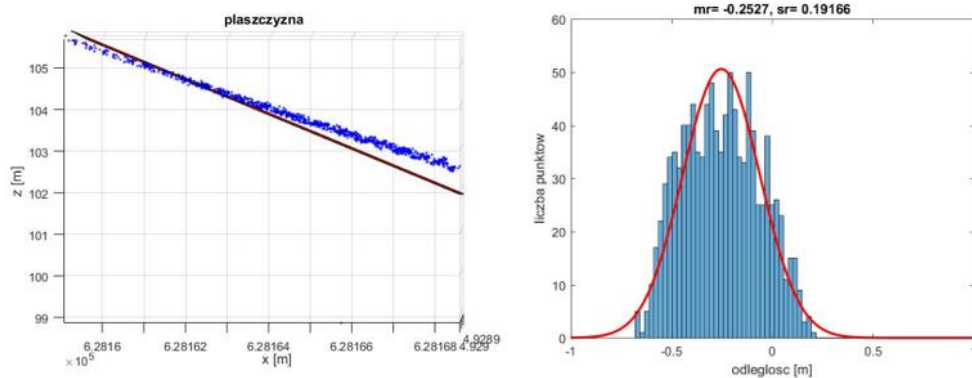
Rys. 13. Przykład połaci dachu, dla której różnica odległości między punktami z ALS rośnie wraz z wysokością (błędne nachylenie modelu dachu)  
Fig. 13. Example of roof surface, for which the distance of the ALS points is growing with the height (error in slope of roof plane)

Na rysunku 14 przedstawiona została połać dachu, dla której odległość od chmury punktów z ALS jest stała, lecz duża. Średnia odległość wynosi 0.38 m przy odchyleniu standardowym na poziomie 7 cm, co wskazuje na błąd systematyczny w modelowaniu.



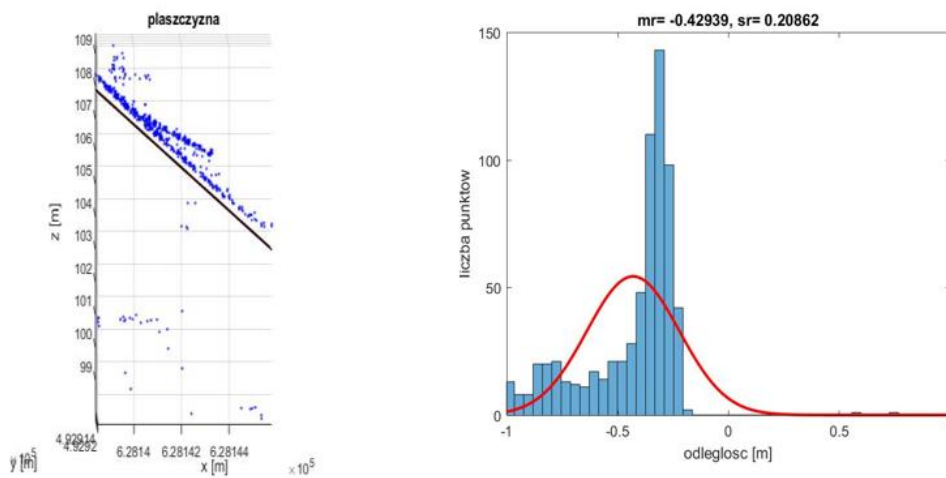
Rys. 14. Przykład połaci dachu ze stałą, lecz dużą odległością od chmury punktów z ALS  
Fig. 14. Example of a roof surface with constant, but high point distance

Na rysunku 15 pokazany został przykład płaszczyzny dachu o widocznym innym nachyleniu niż chmura punktów. Na histogramie widać, że różnice między chmurą punktów z ALS a połącią dachu przyjmują wartości zarówno ujemne, jak i dodatnie, a ich rozkład jest dość płaski.



Rys.15. Przykład płaszczyzny o innym nachyleniu niż chmura punktów ALS  
 Fig. 15. Example of a roof surface with different slope than ALS point cloud

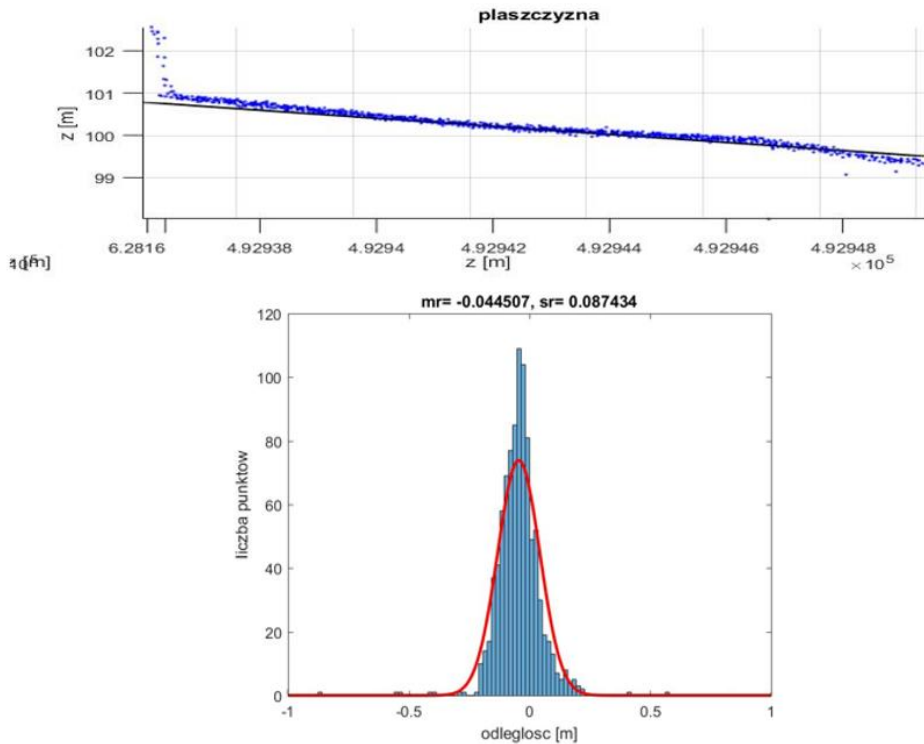
Problemem w modelowaniu budynków mogą okazać lukarny oraz inne obiekty znajdujące się na dachach budynków. Na rysunku 16 pokazane zostało, jaki wpływ na rozkład różnic na histogramie mają dodatkowe obiekty na dachu. Na przekroju przez chmurę punktów widać lukarnę jednonapadową, która według standardów CityGML nie wymagała uwzględnienia w modelu, ale ma wpływ na rozkład różnic oraz na wartość średnią odległości i odchylenie standardowe.



Rys. 16. Wpływ elementów na dachu na rozkład różnic na histogramie  
 Fig. 16. Influence of roof elements on the distance distribution

Ostatni model przeanalizowany w tej części to płaszczyzna dachu, dla której średnia odległość od chmury punktów z ALS wynosi:  $-0.045$  m, a odchylenie standardowe:  $0.087$  m. Tę płaszczyznę można przyjąć za wzorową jeśli chodzi o modelowanie budynków (rys. 17).





Rys. 17. Przykład poprawnie wygenerowanej płaszczyzny dachu z niewielką różnicą odległości chmury ALS do wymodelowanej płaszczyzny dachu  
Fig. 17. Example of properly generated roof surface with low distance between roof plane and ALS point cloud

#### 4. DYSKUSJA I OCENA WYNIKÓW

Wykorzystując przedstawioną propozycję metodyki kontroli modeli 3D w ramach eksperymentu wykonano kontrolę 3 obszarów testowych modeli 3D budynków dzielnicy Ochota w Warszawie o łącznej liczbie 1773 połączeń. W wyniku kontroli wszystkich budynków udało się wyselekcjonować te, które są problematyczne odnośnie ich dokładności wysokościowej czy nadmiernej generalizacji. W przypadku ostatniego obszaru testowego procent budynków, które nie spełniały założonego kryterium był większy niż zakładany w projekcie CAPAP. Weryfikacja obniżonego kryterium akceptacji modelu o 20% (analogicznie jak w CAPAP) nie rozwiązała tego problemu, co w kontekście prawdopodobnej zbytnej generalizacji budynków sprawia, że powinny one być poddane poprawie przez wykonawcę.

Porównując uzyskane wyniki analizy dokładności budynków (Tabela 2) z rezultatami zaprezentowanymi w Oude i Vosselman (2011), uwagę zwraca to, że znacznie więcej punktów, tj. ponad 15% leży w odległości ponad 20 cm od płaszczyzny, podczas gdy w cytowanej publikacji było to niecałe 6%. Przyczyną tej różnicy może być fakt, że w swoich

porównaniach Oude i Vosselman (2011) wykorzystują bezpośrednio połączenie dachów z chmury punktów bez dodatkowej generalizacji do LOD2, która miała miejsce w przypadku modeli wykorzystanych w części eksperymentalnej poniższego artykułu. Również ze względu na generalizację, zróżnicowanie gęstości chmury punktów oraz wielkość połączeń dachów, przy ocenie gotowych modeli 3D nie można jako oceny ich jakości przyjąć liczbę punktów odstających, tak jak zrobili to Oude i Vosselman (2011), wyszczególniając płaszczyzny, dla których więcej niż 20 punktów leży w odległości większej niż 20 cm.

Zaproponowana metoda opierająca się o histogramy pozwala na bardziej szczegółową ocenę poszczególnych płaszczyzn. W przypadku jej wykorzystania możliwa jest nie tylko ocena czy dana płaszczyzna spełnia wymagania dokładności standardu LOD2, ale również, w jakim stopniu została ona poddana generalizacji. Do detekcji generalizacji można w tym wypadku wykorzystać testy statystyczne (np. test Kołmogorowa-Smirnowa). W ten sposób możliwe byłoby wprowadzenie miar jakościowych dla poszczególnych płaszczyzn bądź budynków, co może być ważne w przypadku korzystania z danych, które zostaną opracowane w ramach projektu CAPAP.

## **5. WNIOSKI I DALSZE PRACE**

Automatyzacja procesu oceny dokładności modeli budynków ma wiele zalet, ponieważ umożliwia sprawdzenie wielu modeli budynków, a następnie skupienie się na tych modelach, co do których pojawiły się pewne niezgodności. Ponadto, automatyzacja może dostarczyć parametry statystyczne (jakościowe) dla każdej analizowanej płaszczyzny. Podczas analizy widoczne było jak ważna jest poprawna klasyfikacja chmury punktów, w szczególności przy automatyzacji analizy dokładności.

Kluczowym problemem przy ocenie dokładności jest generalizacja modeli budynków. Metoda oceny powinna pozwolić ją zidentyfikować i pozwolić ocenić, czy spełnia stawiane wymagania. Wykorzystanie oceny histogramu pozwala zidentyfikować płaszczyzny dla których wykonano generalizację, a w niektórych przypadkach np. dla połączeń o tym samym kierunku, ale różnym spadzie (rys. 11) ocenić czy generalizacja została przeprowadzona w sposób prawidłowy. Niestety w ten sposób nie da się sprawdzić poprawności generalizacji w przypadku bardziej skomplikowanych elementów (np. lukarn, rys. 15). W tym przypadku lepszym sposobem byłaby analiza 2D połączeń w płaszczyźnie XY. Innym przykładem tego typu problemów mogą być klimatyzatory montowane na dachach.

Mimo, że płaszczyzny budynków, które analizowane są w artykule, spełniają przyjęty próg dokładności, pojawiają się niedociągnięcia w modelowaniu, które można wykryć na podstawie analizy rozkładu różnic między połączeniem dachu a chmurą punktów przedstawionej na histogramie. Przedstawiona w artykule metoda analizy dokładności modeli budynków na podstawie danych z ALS pozwala na wyznaczenie parametrów jakościowych dla wszystkich modeli. Zaletą przedstawionej metody jest automatyzacja. Uzyskanie parametrów statystycznych dla dużego zbioru kilkuset budynków nie jest procesem czasochłonnym. Wykrycie budynków niespełniających statystyczną weryfikację systematycznego błędu przesunięcia połączenia (analiza wartości średniej odległości połączenia od chmury ALS) lub błędu związanego z pominięciem elementów, które mogły podlegać zbytnej generalizacji (analiza odchylenia standardowego odległości połączenia od chmury ALS), wskazują problematyczne budynki, które zlecić można poprawie. Podejście to jest ciekawą alternatywą dla kontroli

tylko określonego procentu budynków realizowanej w projekcie CAPAP. W kolejnych pracach dotyczących analizy dokładności modeli 3D budynków autorzy planują dalsze próby automatyzacji tego procesu z uwzględnieniem segmentacji chmury punktów, a także kontrolę modeli w strukturze *mesh*, wygenerowanych ze zdjęć ukośnych.

## LITERATURA

- Akca D., Freeman M., Sargent I., Gruen A. 2010. Quality assessment of 3D building data. *The Photogrammetric Record* 25(132), 339–355.
- Biljecki F., Ledoux H., Stoter J. 2016a. An improved LOD specification for 3D building models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 59, 25-37.
- Biljecki F., Ledoux H., Stoter J., Vosselman G. 2016b. The variants of an LOD of a 3D building model and their influence on spatial analyses. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 116, 42-54.
- Cisło-Lesicka U., Borowiec N., Marmol U., Pyka K. 2014. Analysis of usefulness of airborne laser scanning for preparation of 3D buildings model consistent with INSPIRE specification. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 26, 39-52.
- Forlani G., Nardinocchi C., Scaioni M., Zingaretti P. 2006. Complete classification of raw LIDAR data and 3D reconstruction of buildings. *Pattern Analysis and Applications* 8(4), 357-374.
- Główny Urząd Geodezji i Kartografii, 2017. Kontrola modeli 3D budynków. Szczegółowy Opis Przedmiotu Zamówienia (SOPZ) <http://www.gugik.gov.pl/>
- Jarząbek-Rychard M. 2012. Automatyczna budowa wektorowych modeli 3D budynków na podstawie danych lotniczego skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 24, 99 - 109.
- Kada M., McKinley L. 2009. 3D building reconstruction from LiDAR based on a cell decomposition approach. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 38, 47-52.
- Kolbe T. H., Gröger G., Plümer L., 2005. CityGML: Interoperable access to 3D City Models. In: van Oosterom P., Zlatanova S., Fendel E.M. (eds) *Geo-information for Disaster Management*, Springer, Berlin, Heidelberg, 883-899.
- Kurczyński Z., Bakula K. 2013. Generowanie referencyjnego numerycznego modelu terenu o zasięgu krajowym w oparciu o lotnicze skanowanie laserowe w projekcie ISOK. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*. wydanie specjalnie Geodezyjne Technologie pomiarowe, s. 59-68
- Li J., Xiao Y., Wang C 2013. Quality assessment of building roof segmentation from Airborne LIDAR data. In *Geoinformatics, 2013, 21st International Conference on* (pp. 1-4). IEEE.
- Marjasiewicz M., Malej T. 2014. Półautomatyczne modelowanie brył budynków na podstawie danych z lotniczego skaningu laserowego, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 26, 87-96.

- Oude Elberink S., Vosselman G. 2011. Quality analysis on 3D building models reconstructed from airborne laser scanning data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(2), 157–165.
- Rottensteiner F., Briese C. 2003. Automatic generation of building models from LIDAR data and the integration of aerial images. *Proc. Int. Soc. Photogramm. Remote Sens.* 34, 174-180.
- 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), 1554-1567.
- Sun S., Salvaggio C. 2013. Aerial 3D building detection and modeling from airborne LiDAR point clouds. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 6(3), 1440-1449.
- Tarsha-Kurdi, F., Landes, T., Grussenmeyer, P., 2007. Hough-transform and extended Ransac algorithms for automatic detection of 3D building roof planes from lidar data. In *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser* 36, 407-412.
- Tarsha-Kurdi F., Landes T., Grussenmeyer P., 2008. Extended RANSAC algorithm for automatic detection of building roof planes from LiDAR data. *The photogrammetric journal of Finland* 21.1, 97-109.
- Verma V., Kumar R., Hsu S., 2006. 3D building detection and modeling from aerial LIDAR data. *Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society Conference on* (Vol. 2, pp. 2213-2220). IEEE.
- Wentz E. A., Zhao Q. 2015. Assessing validation methods for building identification and extraction. *Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, 1-4.

## **ANALYSIS OF 3D MODELLING ACCURACY BASED ON POINT CLOUDS FROM AIRBORNE LASER SCANNING**

KEY WORDS: building modelling, ALS, CityGML LOD2, accuracy analysis, CAPAP

### **Summary**

Building modeling for big areas (city and country modeling) is becoming more popular. Building models are generated among all from airborne laser scanning data and aerial images. Additionally, more attention is devoted to analysis of the accuracy of the 3D building models, especially concerning the accuracy of roof planes segmentation and their vertical and horizontal accuracy. In the article analysis which based on the airborne laser scanning point clouds is presented. The methodology, which is described in this article, based on the accuracy analysis proposed within the CAPAP project, which is currently conducted in Poland. In this approach three test areas were chosen. For every roof surface statistical parameters were calculated, i.e. standard deviation of the normal distance between the roof surface and the point cloud, mean distance between the roof surface and the point cloud, and Root Mean Squared Error (RMSE). In order to assess the accuracy of chosen test areas, RMSE threshold equal 1 m was assumed. Additionally, according to in the analysis proposed within the CAPAP project, if 5% of the analyzed building models exceed the assumed accuracy by 20%, the model is not acceptable and should be corrected. For the areas, which were chosen in the article, one of them does not fulfill the assumed accuracy. Additionally, for the first test area, for 1.04% of the roof surfaces the RMSE value exceeds 1 m, for the second test area it was 0.63%, and for the third one: 12.63%.

In the second part of the article more detailed analysis for selected buildings was conducted. For roof surfaces histograms, which present the distribution of the normal distances were generated and analyzed. The methodology of building models analysis which based on the histograms makes it possible not only to assess whether the building is generated properly and fulfills the CityGML requirements, but also to say if generalization has been conducted and how big impact does generalization have on the model.

The automatic accuracy analysis of the building models can be very helpful in projects which cover big areas. The analysis may indicate buildings, which should be examined in detail. Additionally, accuracy analysis which based on histogram interpretation makes it possible to apply statistical tests in order to assess the if the values distribution is Gauss distribution and to examine whether the generalization during the building modeling was conducted.

#### Dane autorów / Authors' details:

mgr inż. Magdalena Pilarska  
e-mail: magdalena.pilarska@pw.edu.pl  
telefon: 22 234 7587

dr inż. Krzysztof Bakula  
e-mail: krzysztof.bakula@pw.edu.pl  
telefon: 22 234 7694

mgr inż. Wojciech Ostrowski  
e-mail: wojciech.ostrowski@pw.edu.pl  
telefon: 22 234 7694

Przesłano / Submitted 15.12.2017  
Zaakceptowano / Accepted 31.12.2017