

**OCENA DOKŁADNOŚCI MODELU 3D ZBUDOWANEGO NA PODSTAWIE  
DANYCH SKANINGU LASEROWEGO – PRZYKŁAD ZAMKU  
PIASTÓW ŚLĄSKICH W BRZEGU**

**ACCURACY ASSESSMENT OF 3D MODELLING USING LASER SCANNING  
DATA, CASE STUDY OF SILESIAN PIAST DYNASTY CASTLE IN BRZEG**

**Andrzej Borkowski, Grzegorz Józków**

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Geodezji i Geoinformatyki

SŁOWA KLUCZOWE: LiDAR, TLS, modelowanie 3D, ocena dokładności

Coraz większa dostępność technik skanowania laserowego z jednej strony i wzrost gęstości skanowania lotniczego skaningu laserowego z drugiej strony, przyczyniają się do wzrostu zainteresowania modelami 3D zabudowy, tworzonymi w oparciu o dane skaningu laserowego. Modele 3D zabudowy tworzone są coraz częściej na potrzeby zarządzania, administracji, analiz przestrzennych czy promocji miasta lub regionu. W ramach niniejszej pracy przeprowadzono analizę dokładności modelowania Zamku Piastów Śląskich w Brzegu. Model zamku zbudowano na zlecenie Urzędu Marszałkowskiego Województwa Opolskiego, na podstawie danych z lotniczego i naziemnego skaningu laserowego. Dane pozyskano odpowiednio: skanerem ScanStation 2 z rozdzielczością 2 cm na obiekcie i z wykorzystaniem systemu LiteMapper 6800i firmy Riegl z rozdzielczością 12 punktów na metr kwadratowy. Modelowanie wykonano na poziomie szczegółowości LoD3 (Level-of-Detail), to znaczy z uwzględnieniem detali, zarówno na dachach jak i ścianach budynków. Jako tekstury nałożono zdjęcia cyfrowe metodą transformacji rzutowej. Do modelowania wykorzystano program Cyclone 7.1 oraz opracowane w Instytucie Geodezji i Geoinformatyki programy do nakładania tekstur i konwersji danych. Ocenę dokładności modelowania przeprowadzono na podstawie niezależnych pomiarów terenowych wybranych elementów (punktów charakterystycznych) modelowanego obiektu. Pomiar wykonano z punktów niezależnej osnowy założonej techniką RTK, z wykorzystaniem dalmierza bezlusterowego. Obliczone współrzędne punktów potraktowano jako bezbłędne i porównano z odpowiednimi punktami modelu. W wyniku porównania otrzymano następujące średnie wartości odchyłeń poszczególnych elementów modelu: 0.14 m dla elementów wektorowych, 0.13 m dla elementów tekstur. Uzyskane wartości świadczą o tym, że pod względem dokładności utworzone modele spełniają założenia dokładnościowe poziomu LoD4.

## **1. WSTĘP**

Postęp technologiczny w zakresie lotniczego skaningu laserowego z jednej strony i większa dostępność technik skanowania laserowego z drugiej strony powodują, że wzrasta w ostatnich latach zainteresowanie modelami 3D zabudowy, tworzonymi w oparciu o dane skaningu laserowego. Modele 3D zabudowy tworzone są coraz częściej na potrzeby promocji miasta lub regionu, zarządzania antykryzysowego, administracji czy analiz przestrzennych takich jak analiza nasłonecznienia, propagacja hałasu, propagacja zanieczyszczeń etc.

Modelowanie 3D zabudowy na podstawie danych skaningu laserowego jest także aktualnym problemem badawczym, przy czym chodzi tutaj głównie o rozwój metod i algorytmów pozwalających na automatyzację procesu modelowania, głównie na podstawie danych skaningu lotniczego. Modelowanie takie jest procesem złożonym, w którym należy rozwiązać szereg problemów, poczynając od identyfikacji budynku w zbiorze danych do rekonstrukcji modelu wektorowego. Przegląd i omówienie problematyki z tego zakresu można znaleźć w aktualnych pracach (Vosselman i Maas, 2010; Awrangjeb *et al.*, 2010; Keller i Borkowski, 2011).

Chmura punktów zarejestrowana za pomocą naziemnego skanera laserowego, jest ze względu na wysoką rozdzielczość skanowania sama w sobie dobrym odzwierciedleniem modelu budynku. Jednak ze względu na rozmiary zbiorów danych, posługiwanie się takim modelem jest mało praktyczne. Tutaj również istnieje potrzeba stworzenia geometrycznego modelu 3D. W przypadku danych skaningu naziemnego mówi się raczej o automatycznym modelowaniu fasad budynków (Pu i Vosselman, 2006; Boulaassal *et al.*, 2010).

Dane skaningu naziemnego są na ogół niewystarczające do wymodelowania geometrii dachów. Taką informację można pozyskać z danych skaningu lotniczego, ale te ostatnie z kolei zawierają co najwyżej fragmentaryczną informację o fasadach budynków. Kompletne dane potrzebne do modelowania geometrycznego zabudowy otrzymuje się po połączeniu zbiorów danych lotniczego i naziemnego skaningu laserowego. Modelowanie na podstawie połączonych zbiorów danych nie różni się w zasadzie od modelowania na podstawie danych skaningu lotniczego czy naziemnego. Pewne problemy mogą się pojawić na etapie łączenia zbiorów. Wynika to z różnej dokładności obydwu rozpatrywanych sensorów, przede wszystkim z różnej dokładności planimetrycznej punktów pozyskanych tymi sensorami.

W niniejszej pracy przeprowadzono ocenę dokładności modelu 3D Zamku Piastów Śląskich w Brzegu. Model geometryczny zamku zbudowano na podstawie połączonej chmury punktów lotniczego i naziemnego skaningu laserowego.

Problem oceny dokładności modelowania 3D pojawiał się już wcześniej w literaturze. W pracy (Akca *et al.*, 2010) zaproponowano ocenę dokładności wewnętrznej modelu opartą na trójwymiarowym spasowaniu powierzchni. Vosselman (2008) wykorzystuje dachy budynków wymodelowane na podstawie punktów z dwóch sąsiednich pasów skanowania do oceny dokładności planimetrycznej lotniczego skaningu laserowego. Pośrednio jest to również ocena dokładności wewnętrznej modelowania dachów budynków. W pracy (Oude Elberink i Vosselman, 2011) przedstawiono wyczerpującą analizę błędów mających wpływ na dokładność modelowania oraz ocenę dokładności modelowania poszczególnych elementów budynku (głównie dachu). Zaproponowana metoda oceny dokładności oparta jest na analizie chmury punktów, tzn. parametry dokładnościowe wynikają z porównania modelu z danymi skaningu laserowego.

W niniejszej pracy zaproponowano podejście przeciwne. Ocenę dokładności wykonano na podstawie porównania wybranych elementów modelu z wynikami pomiaru tych elementów wykonanymi bezpośrednio w terenie. Ocena taka oparta na analizie różnic pomiędzy dwoma zbiorami danych postulowana jest w pracy (Oude Elberink i Vosselman, 2011). Założeniem dla takiej analizy jest dostępność precyzyjnych danych referencyjnych. Taką rolę pełnią w niniejszej pracy dane z bezpośredniego pomiaru tachimetrycznego obiektu. Zanim jednak przejdziemy do oceny dokładności modelu przedstawiona zostanie krótka charakterystyka danych wykorzystanych do modelowania oraz poszczególne etapy modelowania.

## **2. CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU I POZYSKANIE DANYCH**

Modelowanie 3D zabudowy wykonano w ramach projektu „Opolskie w Internecie – system informacji przestrzennej i portal informacyjno-promocyjny województwa opolskiego” współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Funduszu Rozwoju Regionalnego oraz środków budżetu województwa opolskiego w ramach działania 2.2 Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Opolskiego na lata 2007–2013. Projekt, na zlecenie Urzędu Marszałkowskiego Województwa Opolskiego, realizuje konsorcjum w składzie OPGK Opole Sp. z o.o. (Lider), MGGP Aero Sp. z o.o., Eurosystem Sp. z o.o., Geomatic Sp. z o.o. i Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu. W ramach tego przedsięwzięcia Instytut Geodezji i Geoinformatyki Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu wykonuje przestrzenne modele wybranych obiektów zabytkowych Opolszczyzny, na podstawie danych skanowania laserowego. Jednym z obiektów, dla którego wykonano model 3D jest Zamek Piastów Śląskich w Brzegu, zwany „Śląskim Wawelem”.

Pierwsze wzmianki dotyczące Brzegu i zamku pochodzą z roku 1235. Do roku 1675, do wymarcia linii piastowskiej, zamek był stołeczną rezydencją księstwa brzeskiego. W średniowieczu pięciokrotnie przebudowywany, w roku 1741 zniszczony w znacznym stopniu przez wojska pruskie. W latach 1966–1990 przeprowadzono kompleksową odbudowę zamku i przywrócono jego pierwotne założenie przestrzenne. Bryła zamku jest mieszanką stylów, z szeregiem elementów gotyckich – bogata w detale architektoniczne. Założeniem do modelowania było jak najwierniejsze odtworzenie elementów budynku i detali architektonicznych, z jednoczesnym zachowaniem możliwości efektywnej prezentacji modelu w internecie. Do modelowania wykorzystano połączone chmury punktów z naziemnego i lotniczego skaningu laserowego.

### **2.1. Naziemny skaningu laserowy**

Naziemny skaningu laserowy wykonano skanerem ScanStation 2 firmy Leica wraz z osprzętem i programem Cyclone 7.1. Na potrzeby skaningu założono wokół obiektu sześć punktów osnowy pomiarowej techniką GNSS z wykorzystaniem systemu ASG-EUPOS. Do pomiaru wykorzystano odbiornik Trimble R6. Współrzędne punktów wyznaczono z precyzją wewnętrzną na poziomie trzech centymetrów, w układzie współrzędnych PUWG1992 i obowiązującym w Polsce systemie wysokości normalnych.

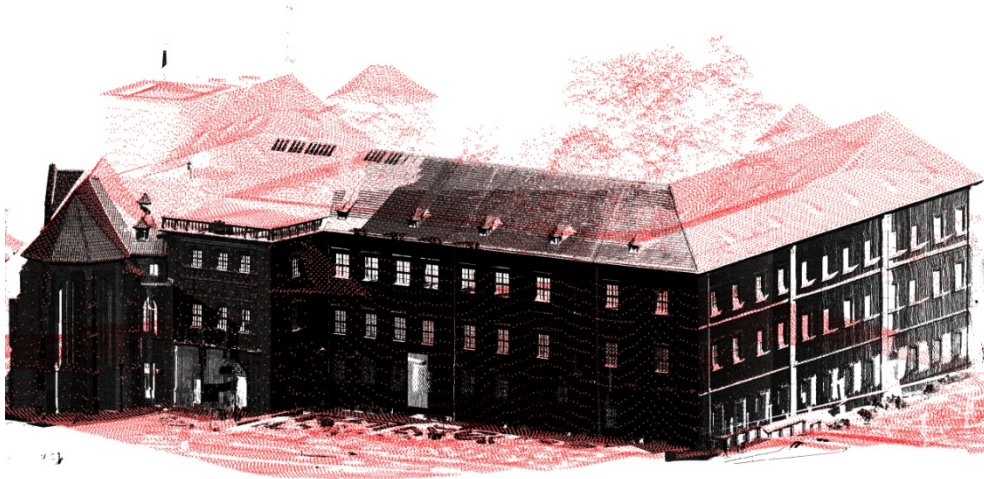
Punkty osnowy posłużyły do georeferencji i połączenia poszczególnych skanów. Skaningu naziemny zrealizowano ze stanowisk swobodnych, z orientacją na tarcze pomiarowe ustawione na punktach osnowy. Skanowanie obiektu wykonano w sumie z 20 stanowisk, ze średnią rozdzielczością 2 cm na obiekcie (średnia odległości pomiędzy punktami na obiekcie). Połączenie i transformację skanów przeprowadzono w programie Cyclone 7.1. Osiągnięto dokładność spasowania skanów na poziomie poniżej jednego centymetra, zarówno dla składowych poziomych jak i wysokościowych.

### **2.1. Lotniczy skaningu laserowy**

Lotniczy skaningu laserowy wykonany został przez firmę MGGP Aero, z wykorzystaniem systemu Lite Mapper, bazującego na skanerze Riegl LMS-Q680i. Skanowanie wykonano z nominalną rozdzielczością 6 punktów na metr kwadratowy. Ze względu na

wspólne pokrycie sąsiednich skanów sięgające 50%, wynikowa chmura punktów dla modelowanego obiektu charakteryzuje się rozdzielczością na poziomie 12 punktów na metr kwadratowy. Dostarczone ostateczne współrzędne punktów podano w takich samych układach jak współrzędne punktów skaningu naziemnego.

Na rysunku 1 zwizualizowano połączoną chmurę punktów pozyskaną z obydwu sensorów i będącą podstawą do modelowania.



Rys. 1. Połączona chmura punktów (fragment) skaningu naziemnego (kolor czarny) i lotniczego (kolor czerwony)

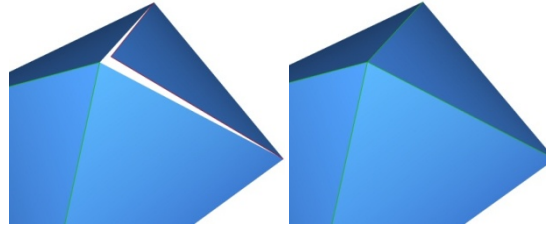
### **3. MODELOWANIE**

Modelowanie 3D Zamku Piastów Śląskich wykonano na podstawie połączonej chmury punktów lotniczego i naziemnego skaningu laserowego. Obydwa zbiory danych połączone zostały na podstawie ich wspólnej georeferencji w układzie PUWG1992. Nie wykonano żadnych zabiegów mających na celu poprawę spasowania obydwu zbiorów. W przypadku potrzeby bądź konieczności poprawy spasowania obydwu rozważanych zbiorów danych należy zastosować odpowiednie algorytmy transformacji, na przykład metodę zaproponowaną w pracy Gruen i Akca (2005), polegającą na wpasowaniu homologicznych powierzchni z wykorzystaniem uogólnionego modelu metody najmniejszych kwadratów.

Modelowanie przeprowadzono z wykorzystaniem programu Cyclone 7.1. W procesie budowy modelu 3D można wyróżnić następujące etapy (Borkowski et al., 2011):

1. Aproksymacja danych skaningu płaszczyznami. Ze względu na łatwość późniejszego nakładania tekstur, wszystkie elementy budynku i detale architektoniczne aproksymowane były płaszczyznami bądź złożeniem płaszczyzn. Do identyfikacji poszczególnych płaszczyzn w zbiorze danych wykorzystano algorytm rosnących regionów.
2. Modelowanie krawędzi budynku jako wyniku przecięcia poszczególnych płaszczyzn, wraz z docięciem płaszczyzn.

3. Kontrola i korekta topologii. Problem ten, zilustrowany na rysunku 2, występuje najczęściej podczas modelowania dachów. Trzy płaszczyzny dachu jednoznacznie wyznaczają dwie krawędzie. Płaszczyzna aproksymująca kolejną połąć dachu wyznaczy kolejne dwie krawędzie, które często nie przecinają się z dotychczasowymi w jednym punkcie.



Rys. 2. Korekta topologii

4. Import NMT i obliczenie przyziemia obiektu jako przecięcia ścian obiektu z NMT.
5. Utworzenie wektorowego modelu 3D obiektu.
6. Transformacja zdjęć cyfrowych do poszczególnych płaszczyzn modelu 3D obiektu oraz edycja i korekta tekstur; usunięcie obiektów obcych na zdjęciu, np. samochodów. Transformację zdjęć wykonano metodą transformacji rzutowej.
7. Nałożenie tekstur na model wektorowy 3D. Wynik modelowania przedstawiono na rysunku 3.



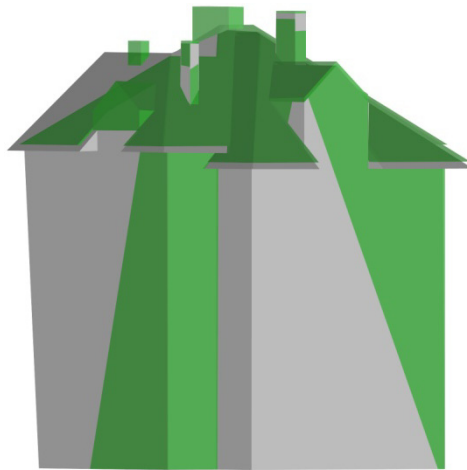
Rys 3. Model 3D Zamku Piastów Śląskich

#### 4. OCENA DOKŁADNOŚCI

Przechodząc do oceny dokładności utworzonego modelu 3D rozpatrzmy błędy, które wpływają na ostateczną dokładność modelu. Należy tutaj wymienić:

1. Dokładność danych skaningu naziemnego.
2. Dokładność danych skaningu lotniczego.
3. Błędy integracji obydwu zbiorów danych.
4. Generalizacja modelu (szczegółowość modelowania) i jednoznaczność identyfikacji poszczególnych elementów modelu (szorstkość modelowanej powierzchni).
5. Błędy wynikające z korekty topologii.
6. Błędy teksturowania.

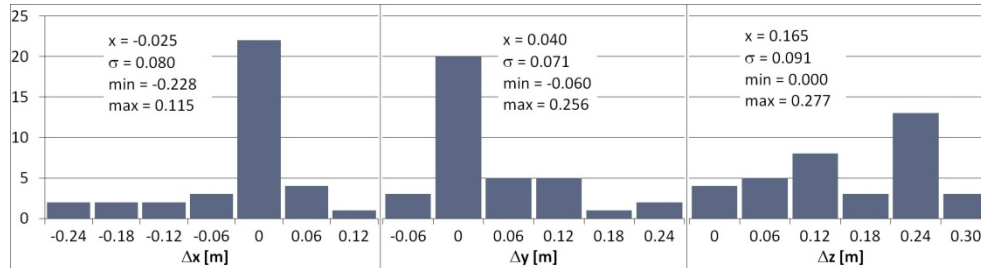
Z charakterystyki obydwu sensorów wynika, że dokładność danych skaningu naziemnego, zarówno planimetryczna jak i wysokościowa, kształtuje się na poziomie kilku centymetrów i jest o około rząd wielkości lepsza od dokładności danych skaningu lotniczego. Sposób integracji obydwu chmur punktów musi mieć zatem wpływ na ostateczną dokładność modelu. W rozpatrywanym przypadku integracja nastąpiła na podstawie prostego połączenia zbiorów. Z rysunku 1 wynika, że na niemal wszystkich powierzchniach budynku można znaleźć punkty pochodzące zarówno z lotniczego jak i naziemnego skaningu, choć oczywiście z różną rozdzielczością. Fakt ten został wykorzystany do oceny swego rodzaju dokładności wewnętrznej modelu, bądź oceny dokładności spasowania obydwu chmur punktów. W tym celu utworzono model 3D w takim zakresie, w jakim dane na to pozwalały, oddzielnie z danych skaningu lotniczego i oddzielnie naziemnego. Złożenie obydwu modeli pokazano na rysunku 4.



Rys 4. Model wektorowy tego samego budynku utworzony z danych skaningu lotniczego (kolor zielony) i naziemnego (kolor szary)

Z rysunku tego wynika, że obydwa modele się przecinają. Dalej, z porównania dolnych krawędzi dachu wynika, że model utworzony ze skaningu lotniczego jest posadowiony wyżej niż model utworzony ze skaningu naziemnego. Aby dokonać oceny ilościowej

stopnia niedopasowania obydwu modeli do siebie porównano współrzędne 39 homologicznych punktów na obydwu modelach. Wynik tego porównania przedstawiono na histogramach (rys. 5).



Rys. 5. Histogramy różnic współrzędnych jednoimiennych punktów modeli utworzonych z danych skaningu lotniczego i naziemnego

Histogramy te przedstawiają różnice współrzędnych jednoimiennych punktów modelu. Od współrzędnych punktów modelu otrzymanego z danych skaningu lotniczego odejmowano współrzędne punktów z modelu otrzymanego z danych skaningu naziemnego. Ponadto na rysunku 5 podano, dla poszczególnych współrzędnych, wartość średnią różnicy współrzędnych ( $\bar{x}$ ), odchylenie standardowe ( $\sigma$ ) oraz wartość minimalną i maksymalną różnicy współrzędnych. Wartość średnia dla składowej wysokościowej potwierdza, że model utworzony z danych skaningu lotniczego posadowiony jest około 16 cm wyżej niż model utworzony z danych skaningu naziemnego. Występowanie błędów systematycznych skaningu lotniczego raportowane było dotychczas w literaturze w odniesieniu do NMT (Kraus, 2000; Gołuch *et al.*, 2007, 2008). Numeryczne modele terenu interpolowane z danych skaningu lotniczego „leżą” na ogół nieznacznie, od kilku do kilkunastu centymetrów, powyżej rzeczywistej powierzchni terenu. Wynika to głównie z szorstkości skanowanej powierzchni. W przypadku powierzchni dachów Oude Elberink i Vosselman (2011) szacują systematyczny błąd wysokościowy elementów dachu modelowanych z danych skaningu lotniczego na poziomie 10 cm. W naszym przypadku otrzymany błąd na poziomie 16 cm wydaje się duży. Być może spowodowany on jest niedociągnięciami na etapie opracowania surowych danych skaningu. Brak jest jednak danych pozwalających na poszukiwanie źródła tego błędu.

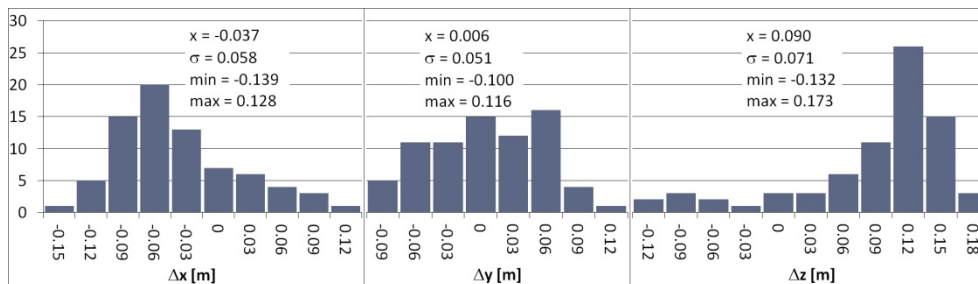
Możliwe błędy wynikające z korekty topologii zobrazowano na rysunku 2. Poważnym źródłem błędów w ostatecznym modelu może być generalizacja elementów architektonicznych oraz szorstkość, czy niejednoznaczność identyfikacji modelowanej powierzchni. Przykładowo: dach modelowanego zamku pokryty jest dachówką typu mnich-mniszka, która w modelu aproksymowana jest płaszczyzną. Niejednoznaczność identyfikacji takiego dachu kształtuje się na poziomie 10 cm.

W dalszych rozważaniach związanych z oceną dokładności wszystkie wymienione w punktach 1 do 6 błędy rozpatrywane będą razem. Ostatecznej oceny dokładności modelu dokonano porównując model z wynikami niezależnego pomiaru bezpośredniego. Pomiar wykonano tachimetrem bezlustrzym Leica TCR407 power z punktów osnowy pomiarowej, których współrzędne wyznaczono techniką GNSS z wykorzystaniem systemu ASG-EUPOS. Na podstawie pomiaru bezpośredniego wyznaczono w sumie współrzędne 75 punktów kontrolnych, w tym 45 na modelu wektorowym i 30 punktów charakterystycznych tekstur. Przykład rozmieszczenia punktów pokazano na rysunku 6.



Rys. 6. Rozmieszczenie pomiarowych punktów kontrolnych. Kolor czerwony – elementy wektorowe modelu, kolor zielony – elementy tekstur

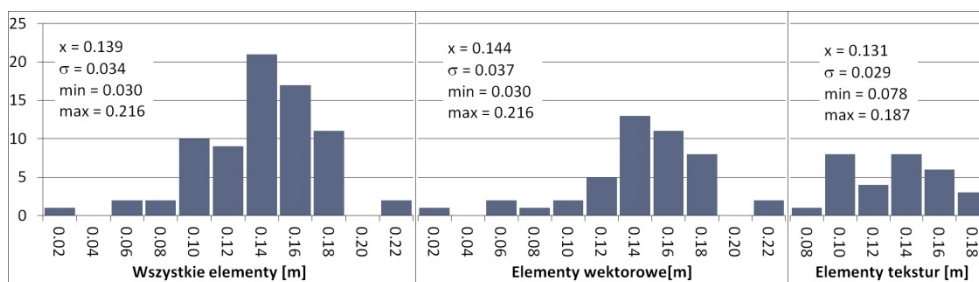
Dla odpowiadających sobie punktów kontrolnych utworzono różnice współrzędnych, odejmując do współrzędnych modelu współrzędne punktów pomiarzone bezpośrednio. Histogramy dla poszczególnych współrzędnych przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Histogramy różnic współrzędnych jednoimiennych punktów modelu oraz punktów pomierzonych bezpośrednio

Z podanych obok histogramów wartości średnich odchyłeń wynika, że model jest posadowiony w przestrzeni wyżej o około 9 cm niż rzeczywiste posadowienie budynku. Jest to wartość około 7 cm mniejsza niż podana na rysunku 5, a wynikająca z porównania modeli utworzonych z danych skaningu naziemnego i lotniczego. Rozbieżność ta wynika z tego, że ostateczny model utworzony został w oparciu o połączone chmury punktów. Znaczna liczba punktów skaningu naziemnego dostępna na dachach pozwoliła w wyniku uśrednienia z danymi skaningu lotniczego, obniżyć model w kierunku wartości rzeczywistych.





Rys. 8. Histogramy odległości przestrzennych pomiędzy punktami modelu a punktami pomierzonymi bezpośrednio

Kolejnym elementem oceny ilościowej modelu było oszacowanie średniej odległości przestrzennej pomiędzy modelem a rzeczywistym położeniem budynku, przyjmując przy tym, że punkty pomierzone bezpośrednio opisują to położenie (są bezbłędne). Odpowiednie histogramy przedstawiono na rysunku 8. Z podanych wartości wynika, że średnia odległość pomiędzy modelem a rzeczywistym położeniem obiektu kształtuje się na poziomie 14 cm i to zarówno dla elementów wektorowych, jak i dla elementów tekstury modelu.

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Modelowanie 3D zabudowy na podstawie danych skaningu laserowego staje się w ostatnich latach coraz częściej zadaniem produkcyjnym. O ile algorytmy modelowania oraz automatyzacja tego procesu są przedmiotem intensywnych badań, o tyle niezależna ocena dokładności produktu jakim jest model 3D znajduje mniejsze odzwierciedlenie w literaturze. Wynika to być może z faktu, że nie są jeszcze zdefiniowane oczekiwania dokładnościowe użytkowników takich modeli. Oczekiwania sprowadzają się najczęściej do podania poziomu szczegółowości modelowania LoD oraz wizualnej oceny jakościowej.

W niniejszej pracy podjęto problem oceny dokładności modelu 3D Zamku Piastów Śląskich w Brzegu utworzonego na podstawie danych lotniczego i naziemnego skaningu laserowego. Ocenę dokładności modelowania wykonano na podstawie porównania modelu z precyzyjnymi danymi referencyjnymi otrzymanymi z bezpośredniego pomiaru tachymetrycznego modelowanego obiektu. W wyniku takiego porównania stwierdzono, że średnia odległość przestrzenna pomiędzy modelem a rzeczywistym położeniem budynku kształtuje się na poziomie 14 cm. Wielkość ta może być utożsamiana z błędem modelowania. Na podkreślenie zasługuje fakt, że błąd nałożenia elementów tekstury (np. narożniki okien) kształtuje się na podobnym poziomie (około 13 cm) jak błąd modelowania elementów wektorowych. Świadczy to o prawidłowym wykonaniu a następnie zrzutowaniu zdjęć cyfrowych. Wydaje się, że otrzymana dokładność modelowania jest wystarczająca dla wielu zagadnień występujących w praktyce. Na podkreślenie zasługuje fakt, że modelowanie przeprowadzono na potrzeby prezentacji internetowej, gdzie wymagana jest możliwie mała objętość zbioru danych.

Oprócz oceny bezwzględnej dokładności modelu, wykonano również ocenę wewnętrznej zgodności zbioru danych skaningu naziemnego i lotniczego. Ocenę taką wykonano porównując modele 3D utworzone oddzielnie dla danych skaningu naziemnego i oddzielnie dla danych skaningu lotniczego. W wyniku porównania stwierdzono, że dane skaningu lotniczego podniesione są o około 16 cm względem rzeczywistości. Aby osiągnąć

większą dokładność modelowania, konieczne jest odpowiednie wpasowanie (transformacja) zbioru danych skaningu lotniczego do zbioru danych skaningu naziemnego.

## 6. LITERATURA

Akca, D., Freeman, M., Sargent, I., Gruen, A. 2010. Quality assessment of 3D building data. *Photogrammetric Record*, 25 (132), 339–355.

Awrangjeb M., Ravanbakhsh, M., Fraser, C. S., 2010. Automatic detection of residential buildings using LIDAR data and multispectral imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 65, 457–467.

Borkowski A., Józków G., Jarząbek-Rychard M., Tymków P., 2011. 3D modeling of the historical monuments for the Opole Province GIS website. *3rd Czech-Polish Symposium Brno-Wrocław "Actual Problems of Geodesy, Cartography and Photogrammetry"*, Brno, Lednice – South Moravia, Czech Republic, May 25–27, 2011, pp. 22.

Boulaassal H., Chevier C., Landes T., 2010. From laser data to parametric models: towards an automatic method for building façade modeling. *Lecture Notes in Computer Sciences*. Vol. 6436, 42–55.

Gołuch P., Borkowski A., Józków G., 2007. Ocena dokładności danych lotniczego skaningu laserowego systemu ScaLARS. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 17., s. 261–270.

Gołuch P., Borkowski A., Józków G., 2008. Badanie dokładności NMT interpolowanego na podstawie danych lotniczego skaningu laserowego systemu ScaLARS. *Acta Scientiarum Polonorum seria Geodesia et Descriptio Terrarum*, (7) 2, s. 37–47.

Gruen A., Akca D. 2005. Least squares 3D surface and curve matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 59, 151–174.

Keller W., Borkowski A., 2011. Wavelet based buildings segmentation in airborne laser scanning data. *Geodesy and Cartography*, Vol. 60 No. 2, pp. 99–123.

Kraus K., 2000. *Photogrammetrie. Band 3. Topographische Informatonssysteme*. Dümmler, Köln.

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, 157–165.

Pu S., Vosselman G., 2006. Automatic extraction of building features from terrestrial laser scanning. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 36, part 5, 5 p.

Vosselman G. 2008. Analysis of planimetric accuracy of airborne laser scanning surveys. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 36, part 3A, 99–104.

Vosselman G., Maas, H-G., 2010. *Airborne and terrestrial laser scanning*. Whittles Publishing, Dunbeath.

W niniejszej pracy wykorzystano, za zgodą Urzędu Marszałkowskiego w Opolu, dane lotniczego i naziemnego skaningu laserowego pozyskane w ramach projektu „Opolskie w internecie – system informacji przestrzennej i portal informacyjno-promocyjny województwa opolskiego”. Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Funduszu Rozwoju Regionalnego oraz środków budżetu województwa opolskiego w ramach działania 2.2 Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Opolskiego na lata 2007–2013.

**ACCURACY ASSESSMENT OF 3D MODELLING USING LASER SCANNING DATA, CASE STUDY OF SILESIAN PIAST DYNASTY CASTLE IN BRZEG**

KEY WORDS: LiDAR, TLS, 3D modeling, accuracy assessment

SUMMARY: Both the increasing availability of laser scanning techniques and the density augmentation of airborne laser scanning data contribute to the growing interest in building 3D models that are created on the basis of laser scanning data. More often 3D building models are being created for the management, administration, spatial analysis and promotion of the city or region. In this paper the modeling accuracy of the Silesian Piast Dynasty Castle in the Brzeg city was performed. The model of the castle based on airborne and terrestrial laser scanning data was built at the Opole Voivodeship Marshal's Office request. This data were obtained respectively by ScanStation 2 scanner with a resolution of 2 cm on the object and by Riegl LiteMapper 6800i system with resolution of 12 points per square meter. Modeling was performed at the level of detail LoD3. It means that details, both on roofs and walls of buildings were included. Textures were created on the basis of digital photos and converted with use of projective transformation. For modeling the Cyclone 7.1 software and developed in the Institute of Geodesy and Geoinformatics software for texturing and data conversion were used. Accuracy assessment was performed on the basis of independent field measurements of modeled object's selected elements (characteristic points). Measurements were made with use of the reflectorless tachymeter basing on the independent geodetic warp established by RTK technique. The calculated coordinates of these points treated as error-free were compared with the corresponding points of the model. As a result of comparison the following mean values of deviations were obtained: 0.14 m for the vector components, 0.13 m for the texture components. The obtained values show that created models in terms of accuracy satisfy the assumptions of LoD4.

Dr hab. inż. Andrzej Borkowski, prof. nadzw.  
e-mail: andrzej.borkowski@up.wroc.pl  
telefon: (71) 3205609  
fax: (71) 3205617

Dr inż. Grzegorz Józków  
e-mail: grzegorz.jozkow@up.wroc.pl  
telefon: (71) 3201951  
fax: (71) 3205617