

Opracowanie modelu 3D na poziomie LoD 3 z wykorzystaniem wybranych technik fotogrametrycznych

Skany kontra zdjęcia

Dynamiczny rozwój technik pomiarowych sprawił, że wskazanie jedynej słusznej metody opracowania trójwymiarowego modelu obiektu nie jest możliwe. Model taki możemy zbudować różnymi sposobami, akceptując zalety i wady danego rozwiązania.

**Tomasz Piegat,
Wojciech Piotrowski**

Celem naszej pracy było stworzenie oraz porównanie dwóch modeli 3D budynku na poziomie szczegółowości LoD 3 wraz z oceną dokładności ich wykonania. Pierwszy (wykonany przez Tomasza) został opracowany na podstawie danych ze skaningu laserowego, a drugi (wykonany przez Wojciecha) – na podstawie zdjęć cyfrowych. Model LoD 3 – zgodnie ze specyfikacją Open Geospatial Consortium – odwzorowuje kształt dachu z elementami charakterystycznymi oraz szczegóły elewacji, a jego dokładność sytuacyjna i wysokościowa to 0,5 m. Może być również wzbogacony fotorealistycznymi teksturami.

Do opracowania wybraliśmy historyczny Gmach Mechaniki PW (rys. 1). Jest to jeden z najmniejszych budynków Politechniki Warszawskiej, ale zawierający dużo skomplikowanych zdobień na elewacji, co czyni go ciekawym obiektem do odwzorowania.

• Pozyskanie danych

Na początku pracy dysponowaliśmy jedynie chmurą punktów z lotniczego skaningu laserowego (ALS) pozyskaną w ramach projektu „Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami” (standard II, co najmniej 12 punktów na m²) oraz chmurą wygenerowaną w programie INPHO na podstawie zdjęć lotniczych (również wykonanych w ramach ISOK) o pikselu terenowym równym 0,1 m. Zawierały one fragment kampusu PW z interesującym nas budynkiem. Dane te były jednak niewystarczające do opracowania modelu



Rys. 1. Gmach Mechaniki na Terenie Centralnym Politechniki Warszawskiej

LoD 3. Pozostałą „naziemną” część danych musieliśmy pozyskać samodzielnie.

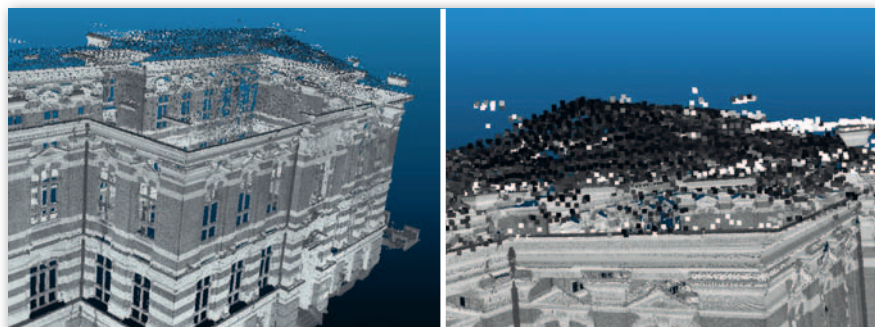
Na budynku rozmieściliśmy osnowę fotogrametryczną (tarcze wydrukowane na kartkach formatu A4), a wokół niego założyliśmy osnowę pomiarową (składającą się z czterech punktów, których współrzędne wyznaczyliśmy metodą RTK), aby osadzić modele w układzie państwowym 1992. Tarczki w nawiązaniu do punktów osnowy pomierzaliśmy

tachimetrem Leica TCR 803. Następnie (już osobno) wykonaliśmy:

● **Tomasz:** 14 skanów o gęstości 10 000 pkt/m² (skaner Z+F Imager 5006h);

● **Wojciech:** serię zdjęć o bazie około 2 m, z pokryciem na poziomie 70% (aparat cyfrowy Canon EOS 350D).

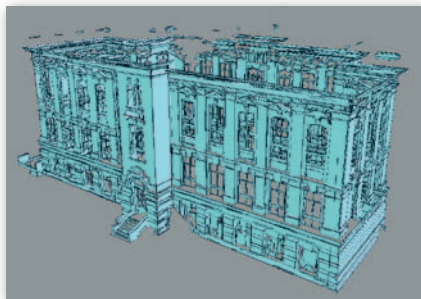
Dzięki temu, że Gmach Mechaniki znajduje się w bezpośrednim sąsiedztwie wyższego budynku (Gmachu Inżynierii



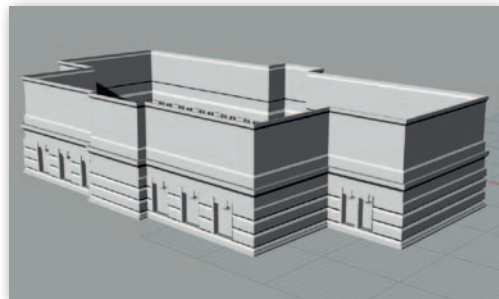
Rys. 2. Różnica w gęstości chmur (po odfiltrowaniu) z ALS (dach) i TLS (ściany): po lewej – wszystkie punkty tej samej wielkości, po prawej – punkty z ALS (dach) powiększone



Rys. 3. Chmura punktów utworzona ze zdjęć naziemnych po ręcznej filtracji



Rys. 4. Ostateczny model elewacji wytworzony w programie Pointfuse Pro na podstawie danych ze skaningu naziemnego



Rys. 5. Modelowanie pierwszego piętra w oprogramowaniu Rhinoceros 5

Środowiska) możliwe było wykonanie z niego zdjęć południowo-zachodniej części dachu obiektu.

● Wstępne przetworzenie danych

● **Tomasz:** Pracę rozpocząłem od zorientowania wykonanych przez siebie skanów. Użyłem do tego celu oprogramowania Autodesk ReCap, które – w wykorzystanej przeze mnie wersji – łączy chmury prawie automatycznie. Na kolejnych parach skanów wskazywałem jedynie zgrubnie trzy punkty homologiczne, przy czym nie musiały to być punkty sygnalizowane, a np. charakterystyczne elementy budynku. Oczywiście istnieją bardziej dokładne metody dopasowania, ale do celów modelowania na poziomie LoD 3 ta wykorzystana przeze mnie była w pełni wystarczająca. Następnym krokiem była filtracja uzyskanej chmury, którą wykonałem ręcznie w programie CloudCompare poprzez wycięcie nieistotnych lub zaszumionych fragmentów skanów. Taką samą operację przeprowadziłem na danych pochodzących z ALS. Dzięki wspólnemu układowi współrzędnych mogłem od razu sprawdzić, czy chmury przedstawiające dach (skanowanie lotnicze) i elewację (skanowanie naziemne) pasują do siebie (rys. 2).

● **Wojciech:** Programem, którego użyłem do utworzenia chmury punktów ze zdjęć, był Agisoft PhotoScan (rys. 3). Pozwala on w wygodny sposób wyznaczać orientację zewnętrzną zdjęć, a tak-

że tworzyć produkty pochodne, takie jak chmury punktów czy siatki mesh. Najpierw spróbowałem przetworzyć wszystkie fotografie jednocześnie, jednak program nie poradził sobie z prawidłowym wyznaczeniem parametrów orientacji zewnętrznej zdjęć. Mogło to być spowodowane zbyt małym pokryciem wzajemnym obrazów lub dużym podobieństwem poszczególnych fragmentów budynku. Podzieliłem więc zdjęcia na grupy przedstawiające kolejne ściany, a następnie przetworzyłem je oddzielnie, łącząc na koniec otrzymane chmury na podstawie nadanej georeferencji. Agisoft posiada również narzędzia, dzięki którym mogłem przeprowadzić podstawową filtrację, usuwając szumy i obiekty, które nie były przedmiotem zainteresowania. Po takim przygotowaniu chmurę punktów ze zdjęć naziemnych połączyłem z chmurą ze zdjęć lotniczych, aby uzupełnić brakujący fragment dachu.

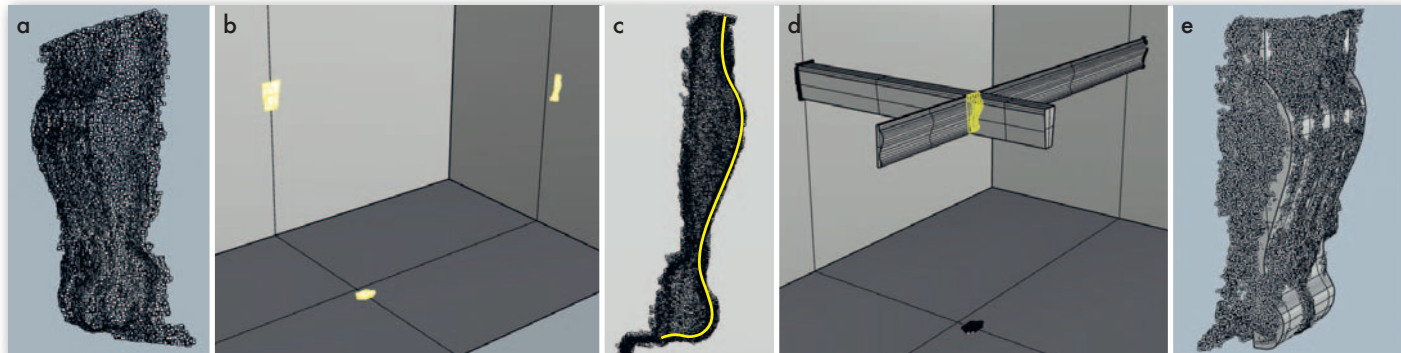
W ramach naszej pracy testowaliśmy również program Pointfuse, który służy do automatycznego generowania modeli 3D na podstawie chmur punktów. Modele te nie są jednak siatką połączonych ze sobą trójkątów popularnie zwanych *meshami*, a składają się z niezależnych płaszczyzn, których liczba zależy od wielkości obiektu oraz ustawień parametrów programu. Takie podejście pozwala na szybsze tworzenie modeli, które w dodatku są „lżejsze” niż *meshe*.

● **Tomasz:** Płaszczyzny wygenerowane na podstawie chmury punktów pochodzącej ze skaningu były bardzo postrzępione, przecinały się, nachodziły na siebie i upraszczały oryginalne dane (rys. 4). Stanowiły jednak lepszą podstawę do dalszego modelowania w programie graficznym niż chmura punktów. Zajmowały bowiem znacznie mniej miejsca (chmura – 1,7 GB, model z Pointfuse – 7 lub 17 MB w zależności od rozdzielczości), co wielokrotnie usprawniło wyświetlanie i w konsekwencji dalszą pracę.

● **Wojciech:** Nie udało mi się dobrać parametrów programu tak, aby dawał zadowalające efekty. Powodem tych problemów była zapewne zróżnicowana gęstość chmur punktów ze zdjęć, z czym program – przygotowany dla danych ze skaningu – sobie nie radził. W związku z tym zdecydowałem się na modelowanie powierzchni bezpośrednio na podstawie chmury punktów.

● Modelowanie

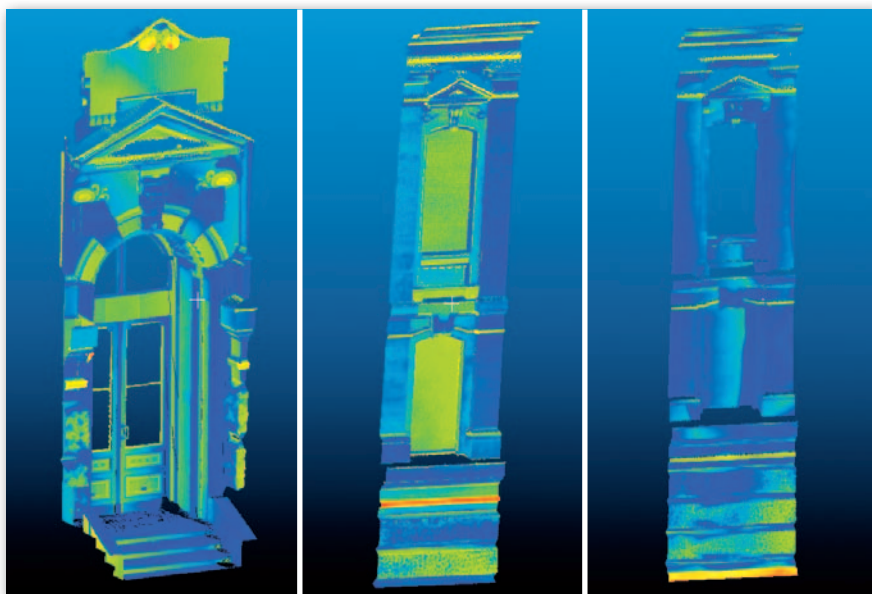
Ta część pracy zajęła nam zdecydowanie najwięcej czasu i przysporzyła najwięcej problemów. Modele zdecydowaliśmy się wykonać w Rhinoceros – programie typu CAD (Computer Aided Design) opartym na technologii NURBS (Non-Uniform Rational Basis Spline) – który umożliwia odwzorowanie dowolnie złożonego kształtu. Aplikację poznawaliśmy całkowicie od podstaw, przez co tworzenie modelu było dla



Rys. 6. Schemat modelowania obiektów na podstawie zrzuconej chmury punktów: wybór fragmentu elewacji (a), rzutowanie chmury na płaszczyznę (b), obrysowanie konturu obiektu (c), wypchnięcie konturu na odpowiednią odległość (d), kontrola bryły z oryginalną chmurą punktów (e)



Rys. 7. Porównanie utworzonej tekstury na podstawie zdjęć bez maskowania (po lewej) oraz z nałożoną maską (po prawej)



Rys. 8. Przykłady pól testowych w skali barwnej w programie CloudCompare. Najmniejsze odstępów prezentowane są na niebiesko, największe – na czerwono i pomarańczowo

nas naprawdę ciekawym wyzwaniem. W pierwszej kolejności modelowaliśmy same ściany budynku bez szczegółów i okien, które z założenia miały być płaszczyznami pionowymi. Następnie opracowaliśmy wnętrza okienne z oknami oraz inne szczegóły elewacji, które „do-klejailiśmy” do ścian (rys. 5).

● **Tomasz:** W moim przypadku modelowanie polegało na tworzeniu nowych płaszczyzn i wpasowywaniu ich w te uzyskane w programie Pointfuse. Rozważałem jeszcze możliwość tworzenia modelu poprzez edycję wierzchołków płaszczyzn z Pointfuse, jednak ze względu na ich nieregularność dużo prostsze i szybsze okazało się definiowanie nowych. Główne problemy, które napotkałem, były związane z brakiem danych wynikającym z przesłaniania obiektów lub ze złej konfiguracji stanowisk skanera. W tych obszarach konieczna była aproksymacja kształtu obiektu.

● **Wojciech:** Program Rhinoceros obsługuje chmury punktów, jednak nie wyświetla ich kolorów, co utrudnia interpretację modelowanych elementów.

Jeszcze większym problemem była duża „zasobożerność” programu w momencie wyświetlania chmury punktów, przez co potrzebne było jej przepróbkowanie oraz podział na mniejsze fragmenty. Mimo tych problemów modelowanie na surowych danych posiada niewątpliwą zaletę – brak generalizacji spowodowanej automatycznym generowaniem płaszczyzn. Sam proces modelowania przebiegał według następującego schematu (rys. 6): dla każdego elementu elewacji tworzyłem płaszczyznę, na której rzutowałem chmurę punktów, na podstawie rzutów rysowałem kontur obiektu i następnie wypychałem go na odpowiednią odległość. Po utworzeniu bryły danego elementu istotna była również wizualna kontrola z oryginalną chmurą punktów.

Do modelowania dachu wykorzystaliśmy natomiast dane pozyskane z pułapu lotniczego.

● **Tomasz:** Chmura punktów ze skaningu lotniczego, mimo iż została wykonana w „najgęstszym” standardzie, była zdecydowanie rzadsza od chmury ze skaningu naziemnego. Zaowocowało to widoczną różnicą w szczegółowości odwzorowanych obiektów, zwłaszcza kominów, które zostały zignorowane przez program Pointfuse. Dlatego na podstawie płaszczyzn z Pointfuse stworzyłem główne połączenie dachu, a modele kominów wykonałem, wykorzystując punkty pochodzące z ALS zarejestrowane na ich górnych powierzchniach.

● **Wojciech:** W moim przypadku podstawowym źródłem danych przedstawiających dach były zdjęcia wykonane z sąsiedniego budynku. Mimo że fotografie wykonywane były przez szybę (co znacznie utrudniło proces matchingu), okazały się one bardzo pomocne w dokładnym modelowaniu poszczególnych elementów, a także w późniejszym procesie na-

Tab. 1. Porównanie odstępów między punktami osnowy fotogrametrycznej a powierzchnią modelu

	Model utworzony na podstawie	
	skaningu laserowego	zdjęć cyfrowych
Średni odstęp [m]	0,025	0,024
Maksymalny odstęp [m]	0,074	0,063
RMSE [m]	0,032	0,030

Tab. 2. Porównanie odstępów między powierzchnią modeli a chmurą punktów ze skaningu laserowego

	Model utworzony na podstawie	
	skaningu laserowego	zdjęć cyfrowych
Średni odstęp [m]	0,033	0,024
RMSE [m]	0,041	0,033

kładania tekstur. Ponieważ nie byłem w stanie wykonać zdjęć całego dachu, wykorzystałem również chmurę punktów ze zdjęć lotniczych, utworzoną na fotogrametrycznej stacji cyfrowej INPHO.

• Teksturowanie

Finalnym etapem opracowania modelu było nałożenie tekstur, za które posłużyły nam przede wszystkim zorientowane cyfrowe zdjęcia naziemne. Proces mapowania tekstury na jeden z modeli – utworzony na podstawie chmur punktów ze zdjęć – przeprowadziliśmy w programie Agisoft PhotoScan. Wcześniej jednak sprawdziliśmy orientację normalne wszystkich utworzonych powierzchni modelu i – w razie potrzeby – obróciliśmy je w kierunku zewnętrznym (inaczej tekstura zostałaby nałożona „od wewnątrz” i elementy od strony obserwatora byłyby przezroczyste). Następnie przekształciliśmy nasz model do postaci siatki trójkątów *mesh*, ponieważ tylko w takiej postaci mógł on zostać odczytany przez Agisoft.

Podczas wykonywania fotografii budynek był w wielu miejscach przesłonięty (np. przez zaparkowane tuż obok ścian samochody). Agisoft PhotoScan pozwala na maskowanie zdjęć, tak aby wyłączyć niepożądane fragmenty obrazów z procesu mapowania tekstury na model (rys. 7). Nie udało się jednak uniknąć błędów spowodowanych martwymi polami (powierzchnie zasłonięte przez elementy budynku – np. dach za kominami, czy widoczne tylko od góry – np. parapety), gdzie tekstura została rozciągnięta z sąsiednich powierzchni.

Aby poprawić wygląd dachu (szczególnie po stronie, której nie udało się sfotografować), dołączyliśmy do projektu zdjęcia lotnicze. W efekcie uzyskaliśmy jednak teksturę o bardzo niskiej rozdzielczości. Niestety, nie mieliśmy dostępu do tak popularnych w ostatnim czasie dronów, które z pewnością bardzo pomogłyby nam rozwiązać ten problem.

• Ocena dokładności

Zgodnie ze standardami LoD najważniejszym kryterium dokładnościowym wykonania modelu jest dokładność bezwzględna. W przypadku LoD 3 powinna ona wynosić co najmniej 0,5 m sytuacyjnie i wysokościowo. Analizę dokładności uzyskanych modeli wykonaliśmy na dwa sposoby. Pierwszy z nich (tab. 1) polegał na zbadaniu odstępów punktów osnowy fotogrametrycznej rozmieszczonych na ścianach budynku od powierzchni modelu. Wartości te uzyskaliśmy za pomocą programu CloudCompare. Następnie dla każdego modelu obliczyliśmy średni

odstęp z 35 punktów osnowy oraz RMSE (średni błąd kwadratowy).

Dodatkowo wykonaliśmy ocenę dokładności na podstawie odległości pomiędzy powierzchniami modeli a wybranymi fragmentami chmury punktów ze skaningu laserowego (tab. 2). Przyjęliśmy zatem dane laserowe za referencyjne, nie biorąc pod uwagę błędów instrumentalnych, pomiarowych, poziomowania, orientacji skanów itd. Taką oceną opierała się jednak na znacznie większej próbie punktów niż w poprzednim przypadku. Uznaliśmy również, że będzie wystarczająco trafna w kontekście sprawdzenia kryterium dokładnościowego poziomu LoD 3. Wy-

braliśmy 10 obszarów testowych (najbardziej skomplikowane elementy budynku, przekroje podłużne wzdłuż ścian, dach), a następnie, również w CloudCompare, obliczyliśmy odstęp od modeli dla każdego punktu poszczególnych obszarów testowych (rys. 8). Następnie obliczyliśmy średni odstęp dla całych modeli (średnia ważona wszystkich odstępów z obszarów testowych, gdzie wagę stanowiła liczba punktów w obszarze) oraz całkowite błędy średnie RMS (średnia ważona wszystkich błędów RMS dla poszczególnych obszarów testowych).

Przeprowadzona przez nas analiza wykazała, że modele spełniły kryterium stawiane przez poziom szczegółowości

REKLAMA

HEXAGON
SAFETY & INFRASTRUCTURE

KONFERENCJA
HxGN LOCAL POLAND 2016
5-7 PAŹDZIERNIKA, Sopot

W KIERUNKU INTELIGENTNYCH ZMIAN

Już po raz dwudziesty, ale po raz pierwszy w zupełnie nowym wydaniu, firma Intergraph Polska organizuje konferencję poświęconą zagadnieniom z zakresu technologii informacyjnych i rozwiązań dla administracji publicznej, służb mundurowych, transportu, przedsiębiorstw komunalnych, telekomunikacyjnych oraz energetycznych.

Wraz z partnerami z grupy Hexagon serdecznie zapraszamy do wzięcia udziału w HxGN Local Poland 2016!

 **ZAREJESTRUJ SIĘ JUŻ DZIŚ
I SKORZYSTAJ Z 10% ZNIŻKI!**

WWW.HXGNLOCAL.PL

HxGN LOCAL  **POLAND
5-7 PAŹDZIERNIKA 2016**

LoD 3. Zostały one wykonane z dokładnością około 20-krotnie wyższą niż wymagane 0,5 m. Musimy przyznać, że taki wynik nas zaskoczył. Dlaczego wyszło tak dokładnie? W jakimś stopniu wynikało to z braku doświadczenia w modelowaniu i generalizacji chmur punktów, przez co nie wiedzieliśmy, co można, a czego nie powinno się upraszczać. Przede wszystkim jednak poza zrealizowaniem głównego celu, wynikającego z tytułu naszej pracy, chcieliśmy stworzyć po prostu jak najlepsze modele dla własnej satysfakcji. Do tego doszła oczywiście nutka rywalizacji o to, czyj model będzie dokładniejszy – tutaj zwyciężył Wojciech. Choć należy również zauważyć, że Wojciech modelował bezpośrednio na podstawie chmury punktów, a Tomasz – na podstawie już zgeneralizowanych płaszczyzn, co najprawdopodobniej miało swój wpływ na gorszy wynik jego modelu.

• Model ze skanów czy zdjęć?

Pozyskiwanie danych przestrzennych ze zdjęć cyfrowych jest techniką bardziej elastyczną niż skanowanie laserowe i pozwalającą na szybsze przeprowadzenie pomiaru. Jej zaletami są niewielkie gabaryty sprzętu pomiarowego (apara-

tu) oraz brak konieczności dokładnego doboru stanowisk i poziomowania instrumentu. Możliwość wykonywania zdjęć z wielu pozycji w bardzo szybkim tempie pozwoliła ponadto na lepsze odwzorowanie takich elementów, jak szczególnie dachu czy rampa dla osób niepełnosprawnych. Chcemy jednak zaznaczyć, iż przyspieszenie samego pomiaru nie oznacza przyspieszenia całego opracowania, które dla danych LiDAR zajęło zdecydowanie mniej czasu.

Po zakończeniu prac doszliśmy do wniosku, że oprogramowanie Rhinoceros nie jest najlepszym narzędziem do tworzenia modeli na poziomie LoD 3. Praca w tej aplikacji zajęła nam bardzo dużo czasu. Ponadto programy fotogrametryczne zazwyczaj nie korzystają z obiektów NURBS, dlatego też musieliśmy przekonwertować nasze modele do postaci siatki *mesh*, aby były czytelne dla Agisoftu i CloudCompare. Z kolei program Pointfuse dawał niewystarczająco dokładne rezultaty automatycznego tworzenia płaszczyzn. Usprawnił jednak późniejszą pracę – modelowanie na podstawie siatki wielokątów było dużo wygodniejsze, a program, z racji mniejszego rozmiaru danych, działał dużo szybciej niż w przypadku modelowa-

nia bezpośrednio na podstawie chmury punktów.

Chcielibyśmy również zwrócić uwagę na pewną lukę w standardach LoD, które na poziomach 1-3 służą raczej do prezentacji całych miast lub ich części, natomiast poziom szczegółowości LoD 4 zakłada odwzorowanie również wnętrza budynku. W związku z tym brakuje – według nas – standardu szczegółowości dla precyzyjnej reprezentacji jedynie części zewnętrznej pojedynczych lub nawet większych grup obiektów. Dokładnych odwzorowań 3D budynków będzie zdecydowanie przybywać, w związku z czym należałoby uszczegółowić kwestię standaryzacji modeli we wspomnianym zakresie.

Tomasz Piegat, Wojciech Piotrowski

Na podstawie pracy inżynierskiej pt. „Wykonanie trójwymiarowego modelu budynku na poziomie LoD 3 z wykorzystaniem integracji wybranych technik fotogrametrycznych” napisanej przez autorów w Zakładzie Fotogrametrii, Teledetekcji i SIP WGiK PW pod kierunkiem dr hab. Zdzisława Kurczyńskiego i wyróżnionej I miejscem w konkursie na najlepsze prace inżynierskie (patrz s. 40)

Rys. 9. Widok od strony południowo-wschodniej modelu z teksturami nałożonymi w programie Agisoft PhotoScan

