

Porównanie możliwości fotogrametrii bliskiego zasięgu i naziemnego skaningu laserowego w modelowaniu powierzchni biurowych

*Comparison of possibilities of close range photogrammetry and laser
scanning in office interiors modeling*

Bartłomiej KRASZEWSKI

Institut Geodezji i Kartografii
Zakład Systemów Informacji Przestrzennej i Katastru
Ul. Modzewskiego 27, 00-689 Warszawa
bartlomiej.kraszewski@igik.edu.pl

Paulina BRODOWSKA

Wojskowa Akademia Techniczna
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
Instytut Geodezji
Zakład Fotogrametrii i Teledetekcji
ul. Sylwestra Kaliskiego 200-908 Warszawa
e-mail: pbrodowska@wat.edu.pl

Abstract

In paper the authors compared two modern photogrammetric techniques in terms of their application to office 3D modeling. Comparison performed based on 3d modeling of test interior with used of developed methodology. The method determined the way of acquisition and modeling the data from terrestrial digital images, as well as from terrestrial laser scanning. For both measurement techniques the emphasis on obtaining the data is put on the correct relative orientation of the individual photos, or cloud points measured from different positions. For each technology adopted different basic 3d modeling method. Vector data measured on photos were used to approximate the planes, which reproduce by their combination individual elements of space. The simple shape of object located in office space allowed for use in 3d modeling a horizontal and vertical views of point cloud to reproduction contours of the most elements located in rooms. For both used techniques an average deviation between approximated planes and measured points was 4 mm. The relative accuracy of resulting model reproduced based on data from digital images was 3mm and was two times better that accuracy of model from scanning data. In both models, it was found that the completeness of the office space elements reconstruction was 90%. Fully reconstructed objects like walls and furniture.

Key words: close range photogrammetry, terrestrial laser scanning, 3D modeling, interiors, accuracy.

Słowa kluczowe: fotogrametria bliskiego zasięgu, naziemny skaningu laserowy, modelowanie 3D, wnętrza, dokładność.

Wprowadzenie

Współczesne technologie fotogrametryczne w ostatnich latach znalazły szerokie zastosowanie w odtworzeniu modeli 3D budynków. Głównie pozyskane za ich pomocą dane pomiarowe służą do modelowania ich zewnętrznych części. Na świecie obserwuje się jednak wzrost zainteresowania danymi przestrzennymi

pozyskanymi także w ich wnętrzu, które uzupełniają dotychczas pozyskane modele i służą stworzeniu kompleksowych modeli informacji przestrzennej budynku. Utworzone w efekcie modele 3D stanowią będą bogate źródło informacji, które można wykorzystać do celów pomiarowych, poznawczych lub analitycznych. Na szczególną uwagę zasługują możliwości analityczne wirtualnych modeli pozwalające na symulowanie zmian lub też

zjawisk, których nie można przeanalizować w rzeczywistym środowisku lub koszt ich wykonania jest dosyć wysoki. Jednym z takich zastosowań jest analiza dróg ewakuacyjnych z obiektu, którą dzięki modelom możemy wykonać w wirtualnym środowisku z możliwością dokonania modyfikacji poprawiających ich bezpieczeństwo (Lee *et al.*, 2008). Zastosowane w wirtualnej rzeczywistości zmiany po weryfikacji poprawności można przenieść na rzeczywisty obiekt. Zapotrzebowanie na tego typu modele stwarza potrzeby określenia możliwości zastosowania poszczególnych technik pomiarowych w procesie ich wytwarzania, a w szczególności określenia etapów i zasad opracowania w celu uzyskania jak najlepszego wyniku.

Dokładność opracowania, jak również rodzaj obiektów podlegających modelowaniu 3D w pomieszczeniach określa standard CityGML stworzony przez konsorcjum OGC (Groger *et al.*, 2008). Standard ten definiuje cztery poziomy szczegółowości modelowania 3D. Najbardziej dokładny poziom LoD4 stanowi model o pełnym architektonicznym odwzorowaniu zarówno z zewnątrz jak i we wnętrzu, zawierające położenie ścian, drzwi i elementów wchodzących skład budynku o rozmiarach większych niż 0.2m (Fan *et al.* 2009). Obiektami, które należy zamodelować w zgodzie z założonym standardem są: podłogi, sufity, ściany, otwory okienne i drzwiowe, obiekty wnętrza oraz instalacje. Szczegółowy sposób zapisu danych w tym formacie przedstawiony został w publikacjach G. Gregora i L. Plumera (2012) i B. Karaszewskiego (2013).

Do odtworzenia modelu 3D pomieszczeń biurowych wykorzystać można zarówno dane pozyskane na podstawie fotogrametrycznych zdjęć naziemnych, jak również z wykorzystaniem naziemnego skanera laserowego. Opracowanie modeli 3D pomieszczeń budynków, które charakteryzują się różnorodnym kształtem oraz znajdują się w nich wiele obiektów infrastruktury utrudniających

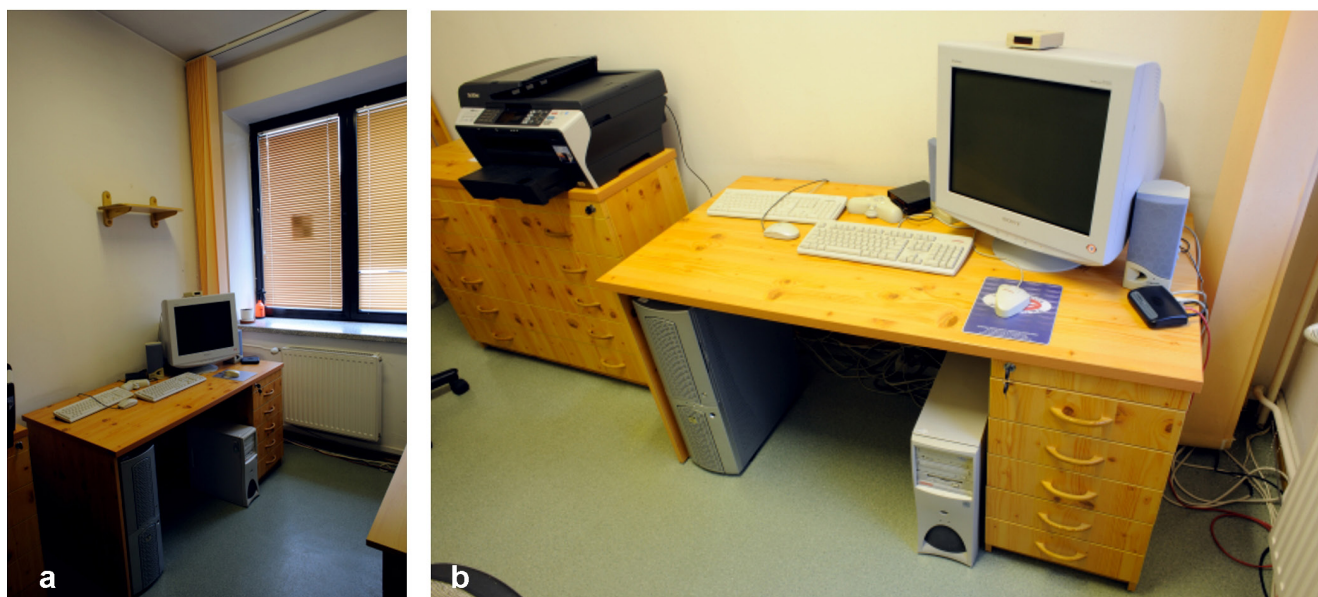
wykonanie poprawnego pomiaru wymaga dostosowania metod zarówno pozyskania jak i późniejszego opracowania danych pomiarowych do postaci modelu 3D. W artykule autorzy zaprezentowali i porównali dwie metody opracowania danych pozyskanych wspomnianymi technikami pomiarowymi. Porównanie opracowanych metod przeprowadzono w oparciu o wykonane modelowanie testowe. Modelowaniu testowemu podlegało przykładowe pomieszczenie biurowe. Uzyskane w wyniku opracowania modele poddane zostały następnie sprawdzeniu dokładnościowemu.

Pozyskanie danych pomiarowych

Fotogrametria bliskiego zasięgu. Pozyskanie poprawnych zobrazowań pomieszczeń jest kluczowym etapem, każdego opracowania fotogrametrii bliskiego zasięgu. Sposób ich wykonania zależy od wielkości i kształtu obiektu podlegającego pomiarowi. Do opracowania wnętrza pomieszczeń najlepiej nadaje się metoda sieci zdjęć zbieżnych. Wybór tej metody uwarunkowany jest potrzebą opracowania różnego typu pomieszczeń i elementów się w nich znajdujących.

Pozyskanie zdjęć tą metodą powinno opierać się na zasadzie od ogółu do szczegółu. W pierwszym etapie należy obrazować całość pomieszczeń, a następnie wykonać zbliżone zdjęcia pojedynczych grup elementów (rys. 1.). Zdjęcia ogólne posłużą do pomiaru danych wektorowych potrzebnych do zamodelowania prostych elementów wnętrza tj. ściany, biurka itp. Zobrazowania szczegółowe pozwolą na opracowanie obiektów o bardziej skomplikowanych kształtach np. monitory.

Pozyskane zobrazowanie należy zorientować wzajemnie poprzez dobór odpowiedniego rodzaju i liczby punktów wiążących. Dla zachowania odpowiedniej dokładności wyznaczenia elementów infrastruktury pomieszczeń



Ryc. 1. Przykładowe zdjęcia pozyskane w etapie: ogólnym (a) i szczegółowym (b).
Fig. 1. Sample images obtained in general (a) and detailed (b) step.

należy na pojedynczym zobrazowaniu wyznaczyć minimum 15 równomiernie rozmieszczonych punktów wiążących znajdujących się, na co najmniej 3 zdjęciach. Kąt między wiązkami pojedynczego punktu dostosowania odtworzonych z poszczególnych zdjęć nie powinien być mniejszy niż 30 stopni. Punktami wiążącymi muszą być szczegóły sytuacyjne, których położenie można jednoznacznie określić z dokładnością nie gorszą niż 3 piksele obrazu źródłowego na wielu zdjęciach zbieżnych. Orientację należy przeprowadzać etapami, tzn. najpierw orientować 5-6 zdjęć, a następnie dołączać do nich kolejne. Kolejne dołączanie zdjęć umożliwia kontrolę błędów orientacji wynikających z nieprawidłowej lokalizacji punktów dostosowania. W pierwszej kolejności należy orientować zdjęcia przedstawiające ogólny plan pomieszczeń w celu wyznaczenia punktów, które posłużą do wpasowania zobrazowań wykonanych w większych skalach.

Zorientowane zobrazowania naziemne służą do wyznaczenia zbioru danych konstrukcyjnych wykorzystanych do budowy modelu 3D wewnątrz. Elementami konstrukcyjnymi są punkty krawędziowe, krawędzie, narożniki oraz obiekty o budowie zbliżonej do brył geometrycznych. Do budowy zbioru danych konstrukcyjnych wykorzystać należy następujące metody pomiaru na zdjęciach z naziemnej kamery cyfrowej: pomiar punktów widocznych na co najmniej 3 zdjęciach; wyznaczenia krawędzi na podstawie co najmniej dwóch zdjęć; wyznaczenie brył walcowych poprzez zdefiniowanie ich pobocznice na kilku zdjęciach; wyznaczenie punktu widocznego tylko na jednym zdjęciu i leżącego na płaszczyźnie określonej, przez wcześniej pomierzone innymi metodami elementy zbioru danych konstrukcyjnych.

Wykorzystując zaproponowane metody pozyskania, orientacji i pomiaru uzyskano przestrzenny zbiór danych wektorowych opisujących wewnątrz testowego pomieszczenia. Opracowane w ramach projektu fotogrametrycznego dane wektorowe nie są jednak metryczne, gdyż pomiar wykonywany jest przez program w domyślnie zdefiniowanym układzie lokalnym. W celu przystosowania ich do celów pomiarowych dokonano ich skalowania na podstawie odległości terenowych pomierzonych metodami bezpośrednimi. Pomiar odcinków wykonano dalmierzem laserowym Bosch GLM 150 z dokładnością $md = \pm 0.5mm$. Skalowanie opracowanych modeli przeprowadzono z dokładnością lepszą niż 1mm.

Naziemny skaningu laserowy. Kompleksowe pozyskanie danych umożliwiających odtworzenie modelu 3D pomieszczenia wymaga odpowiedniej metody umożliwiającej dokładne ich połączenie. Łączenie danych z poszczególnych stanowisk skanowania można wykonać na podstawie sygnalizowanych punktów dostosowania (kule i tarcze referencyjne), szczegółów sytuacyjnych lub też brył i płaszczyzn. Na podstawie przeprowadzonego porównania metod na podstawie testowego opracowania stwierdzono, że do łączenia chmur punktów należy zastosować metodę wykorzystującą elementy sygnalizowane. Metoda ta jest najdokładniejsza i minimalizuje wpływ błędów związanych z wzajemnym dopasowaniem

chmur punktów na dokładność modelowania. Jednocześnie w pomieszczeniach możliwe jest rozmieszczenie tego typu punktów w odpowiedniej konfiguracji.

Przed przystąpieniem do pomiaru pomieszczeń konieczne jest zatem rozmieszczenie stanowisk pomiarowych i punktów dostosowania (sygnałów) niezbędnych do połączenia pojedynczych chmur punktów. Punkty dostosowania rozmieścić należy tak, aby widoczne były z jak największej liczby stanowisk. Natomiast z każdego ze stanowisk widoczne były przynajmniej trzy nieliniowo ułożone punkty dostosowania.

Liczba stanowisk pomiarowych skanera zależna jest od wielkości opracowywanego pomieszczenia oraz znajdujących się w nim obiektów utrudniających pomiar. Przyjąć należy jednak, że w przypadku małych pomieszczeń, dla którego elementy podlegające pomiarowi umieszczone są pod ścianami pomieszczenia pomiar należy wykonać z jednego stanowiska zlokalizowanego centralnie w pomieszczeniu. Wraz ze wzrostem wielkości pomieszczeń liczbę stanowisk należy dobierać w taki sposób, aby możliwe było pozyskanie punktów pomiarowych dla większości znajdujących się w pomieszczeniu obiektów.

Modelowanie 3D

Zebrane na etapie pozyskania dane przestrzenne ze skaningu laserowego i fotogrametrii cyfrowej posłużyły do stworzenia przestrzennych modeli pomieszczenia testowego. W wyniku opracowania zamodelowano wszystkie widoczne elementy, które określone zostały w standardzie CityGML. Założono, że opracowany model wewnątrz powinien charakteryzować nieskomplikowaną budową pozwalającą na prosty pomiar i szybkie przeglądanie. Stwierdzono, zatem że model w jak największym stopniu powinien być zbudowany z prostych elementów takich jak płaszczyzny i bryły geometryczne. Jednocześnie należy dążyć do zamodelowania odpowiednio zgeneralizowanych szczegółów wyróżniających poszczególne obiekty. Na podstawie analizy materiałów źródłowych opracowano metodykę tworzenia modeli dla danych z fotogrametrii cyfrowej i skaningu laserowego. Opracowana metodyka bazowała na narzędziach dostępnych w oprogramowaniu MicroStation, które umożliwia pracę zarówno z danymi wektorowymi, jak i importowaną chmurą punktów. Obie opracowane metodyki zostały ze sobą porównane, a stworzone niezależnie na podstawie różnych danych źródłowych modele poddano analizie dokładnościowej.

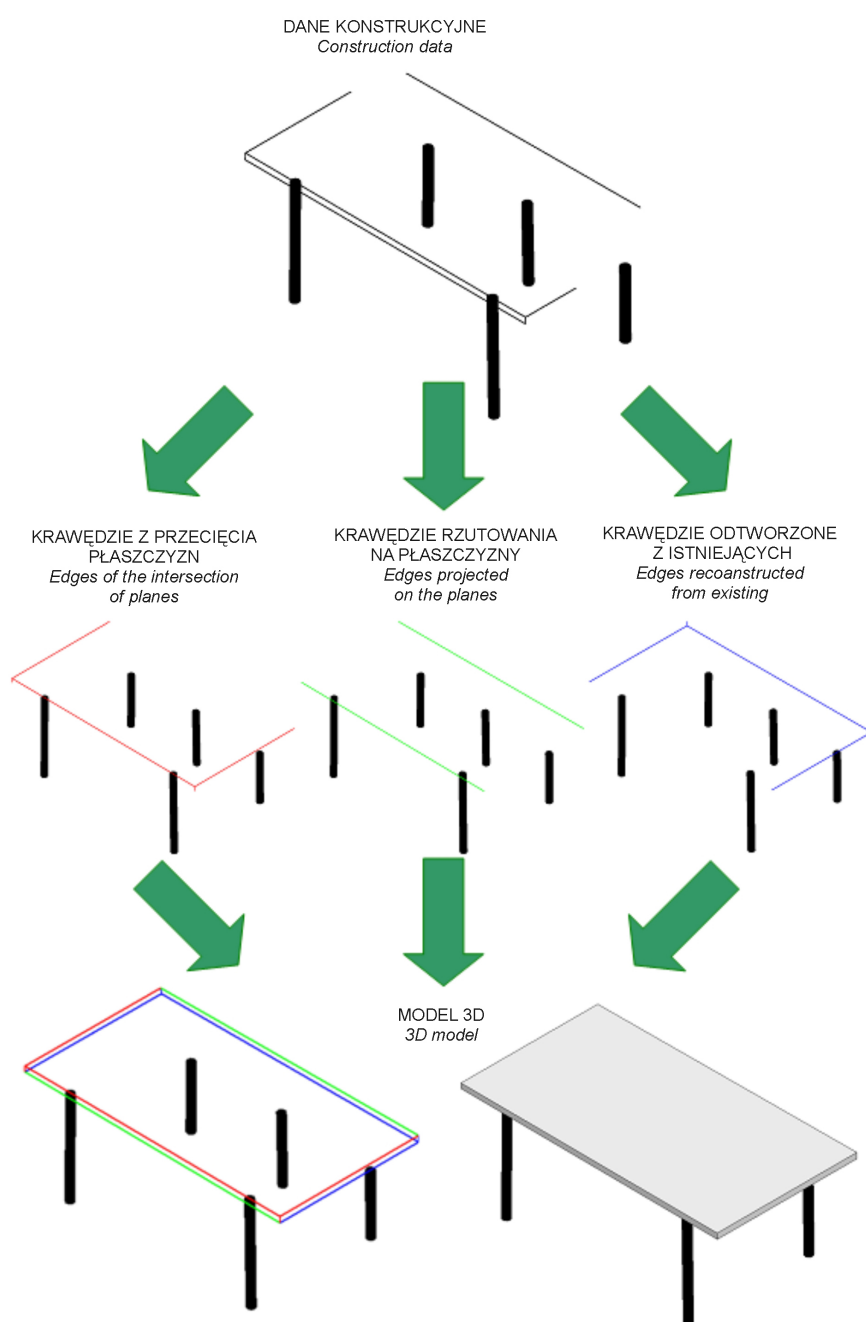
Z wykorzystaniem danych ze zdjęć cyfrowych. W pierwszym etapie prac należy zdefiniować podzbiory danych opisujące konkretne obiekty np. linie i punkty zlokalizowane na ścianach. Podzbiory te posłużą do odtworzenia poszczególnych części obiektu z wykorzystaniem odpowiednich metod modelowania.

Modelowanie rozpoczynamy od odtworzenia kształtu pomieszczenia, które następnie można wykorzystać

jako odniesienie niektórych pomiarów. W tym celu należy aproksymować płaszczyzny odpowiednio opisujące dane pomieszczenie. Do aproksymacji wykorzystujemy wszystkie elementy zbioru danych pomierzone dla tego obiektu (krawędzie, punkty leżące na powierzchni, linie). Następnie wyznaczamy krawędzie między płaszczyznami i punkty ich przecięć. Na podstawie punktów możliwe jest wykreślenie szkieletu pomieszczeń. Na tak utworzone płaszczyzny ścian rzutowane są w kierunku normalnym do powierzchni wszystkie krawędzie wewnątrz, tj. okienne, drzwiowe czy wentylacyjne. Następnie z wykorzystaniem narzędzia wyciągania nadawana im jest odpowiednia głębokość wyliczona z danych wektorowych.

Metodę aproksymacji płaszczyzn można wykorzystać również dla odtworzenia innych elementów zbudowa-

nych z płaszczyzn, dla których istnieją odpowiednie dane źródłowe. Wygenerowane płaszczyzny można wykorzystać do odtworzenia krawędzi obiektów wyznaczając ich wzajemne przecięcia. W przypadku, gdy krawędzi nie można wyznaczyć z przecięcia płaszczyzn to na powierzchnię, na której leży dana krawędź rzutujemy punkty lub linie ją opisujące. Następnie znajdujemy punkty przecięć z innymi krawędziami. Niektórych krawędzi z powodu ich lokalizacji (np. pod obiektem) nie można zamodelować w żaden sposób. Ich odtworzenie dokonuje się poprzez kopiowanie równoległych do nich już stworzonych odcinków, leżących na tej samej płaszczyźnie np. boczne krawędzie blatu stołu. Proces odtworzenia elementu pomieszczenia z zastosowaniem płaszczyzn przedstawiony został na rycinie 2.



Ryc. 2. Sposób odtworzenia obiektów za pomocą aproksymowanych płaszczyzn
Fig. 2. A method of object modeling using the approximated planes.

Metoda aproksymacji płaszczyzn pozwala na zachowanie charakteru odtwarzanych powierzchni. Zastosowanie tej metody do danych fotogrametrycznych wymuszone jest potrzebą ich uśrednienia, w celu jak najlepszego odtworzenia sytuacji pomieszczeń z zastosowaniem prostych elementów modelu.

W przypadku obiektów umieszczonych na innych elementach modelu (np. tabliczki) opisujące je dane wektorowe rzutowanie są na dany obiekt (np. ściana), a następnie odpowiednim narzędziem nadawana jest im odpowiednia głębokość zgodna z wyznaczonymi miarami.

W modelowanych pomieszczeniach występowały również obiekty, które zbudowane były z krzywych stworzonych na podstawie punktów leżących na płaszczyznach lub na krawędziach. W ich przypadku modelowanie przeprowadzono wykorzystując narzędzie tworzenia powierzchni przez krzywe krawędzi. Narzędzie to w prosty sposób pozwalało na uproszczenie skomplikowanej krawędzi przedmiotu.

Bryły walcowe, które w sposób fragmentaryczny opisywały obiekty. Spowodowane to było sposobem ich pomiaru na zdjęciach, gdzie nie zawsze widoczny był cały obiekt. W czasie opracowania należy przedłużyć w taki sposób, aby łączyły się z elementami, które je ograniczają (np. blat stołu).

Dla niektórych obiektów dane wektorowe zostały pozyskane w części. Spowodowane to było niekorzystną lokalizacją niepozwalającą na wykonanie poprawnego zdjęcia lub też przysłonięciem przez inny obiekt. W przypadku, gdy zakres danych umożliwiał częściowe zamodelowanie obiektu, jego pełne odtworzenie następowało z wykorzystaniem funkcji odbicia lustrzanego względem płaszczyzny.

Elementy sieci ciepłowniczej takie jak rury odtworzono z wykorzystaniem określonego ze zdjęć przebiegu środka rury oraz jej średnicy.

Tworzące obiekty płaszczyzny, powierzchnie i bryły zgrupowano w odpowiednie pojedyncze spójne przedmioty.

Z wykorzystaniem danych z naziemnego skaningu laserowego. Modelowanie pomieszczeń wewnątrz z zastosowaniem danych z naziemnego skaningu laserowego szczegółowo opisane zostało w (Kraszewski, 2012). Ogólnie metodę modelowania podzielić można na następujące etapy:

1. Modelowanie ścian pomieszczeń z wykorzystaniem rzutu poziomego i pionowego chmury punktów umożliwiających wyrysowanie obrysu wnętrza, a następnie nadanie im odpowiednich wysokości.
2. Wykorzystanie prostych rzutów chmury punktów do modelowania wszelkiego rodzaju wnęk, otworów okiennych i drzwiowych oraz prostych mebli.
3. Do modelowania obiektów, których nie można odtworzyć z wykorzystaniem prostych rzutów należy wykorzystać metodę segmentacji chmury punktów pozwalającej na aproksymację płaszczyzn. Aproksymowane płaszczyzny posłużyły do znalezienia ich wzajemnych przecięć tworzących krawędzie odtwa-

rzanych obiektów (np. meble) i do rzutowania na nie punktów pomiarowych tworzących profil obiektu, który poprzez ortogonalne przeciągnięcie tworzyły odrębny obiekt (np. włączniki oświetlenia).

4. Część infrastruktury zamodelowaną fragmentarycznie z powodu braku dostatecznej ilości danych uzupełniono o niewidoczną część z wykorzystaniem odbicia lustrzanego istniejącej części.
5. Rury ciepłownicze i systemu klimatyzacji odtworzono poprzez wyznaczenie środków ich przekrojów oraz średnic. Wykorzystując narzędzie przeciągania profilu wzdłuż zadanej krzywej stworzono również ich modele.

Na podstawie przyjętej metodologii postępowania powstał wektorowy model szkieletowy pomieszczeń testowych. Na jego bazie wygenerowano płaszczyzny, powierzchnie oraz bryły. Pojedyncze powierzchnie i bryły zgrupowano w poszczególne obiekty.

Porównanie metod

Proces pozyskania danych z naziemnego skaningu laserowego jest mniej czasochłonny w porównaniu z fotogrametrią cyfrową, ponieważ nie wymaga pomiaru zbioru danych konstrukcyjnych (punktów, linii itp.) i przystosowania ich do celów pomiarowych (skalowanie i łączenie). Dane skanerowe są metryczne i proces ich opracowania sprowadza się do utworzenia jednego spójnego zbioru punktów 3D. Jeśli porównać czasochłonność pozyskania danych źródłowych do modelowania to na 1 godzinę pracy przy projekcie skanerowym przypada ok. 16 godzin prac nad danymi z fotogrametrii cyfrowej.

Odtworzenie większości elementów w pomieszczeniach opierało się na dwóch różnych metodach modelowania uzależnionych od użytych danych źródłowych. Opracowanie danych fotogrametrycznych bazowało głównie na metodzie aproksymacji płaszczyzn. Wynikowy model to w większości efekt operacji na wygenerowanych płaszczyznach.

Prosta budowa pomieszczeń biurowych umożliwiła zastosowanie prostych rzutów zbioru punktów 3D uzyskanych ze skanowania. Poprzez proste widoki chmury punktów (widok płaszczyzny XY, XZ, YZ) można odtworzyć większość obiektów. Metoda segmentacji płaszczyzn znajduje zastosowanie w przypadku elementów, których nie można odtworzyć z wykorzystaniem prostych rzutów. Ta część obiektów stanowiła mały procent opracowania.

Na podstawie opracowania można stwierdzić, że dane źródłowe ze skaningu laserowego pozwoliły na wykonanie założonego projektu szybciej. Dane fotogrametryczne pozwalają na odtworzenie infrastruktury pomieszczeń w podobnym stopniu szczegółowości jak skanowanie, ale w dłuższym okresie czasu. Obiekty niepomierzone ze względu na położenie ich w martwych polach skanera i aparatu należy domierzyć bezpośrednimi metodami pomiarowymi.

W obu rozpatrywanych metodach odtworzenie kształtu pomieszczeń oraz znajdujących się w nich mebli jest

możliwe w całości. Wynika to z prostoty ich budowy, która umożliwi intuicyjne uzupełnienie fragmentarycznie pozyskanych danych. Pozostałe elementy ze względu na ich budowę lub też położenie są trudniejsze do odtworzenia.

Z danych fotogrametrycznych w najmniejszym stopniu można odtworzyć elementy sieci ciepłowniczo-wentylacyjnej. Spowodowane jest to położeniem elementów tej infrastruktury w wielu przypadkach pod wystającymi elementami oraz za innymi obiektami pomieszczeń. Pomiar tych elementów jest utrudniony, ponieważ nie można skorzystać z żadnej z zaproponowanych metod pomiaru danych. W przypadku obu metod w pomieszczeniach testowych można odtworzyć około 90 procent znajdującej się w nich infrastruktury. Brak możliwości modelowania niektórych obiektów wynikał z występowania w pomieszczeniach elementów w części lub w całości przysłoniętych lub też ilość pozyskanych danych źródłowych była niewystarczająca do ich odtworzenia.

Opracowane modele testowe 3D pomieszczeń wykonywane zostały w lokalnych układach odniesienia. Analizę dokładnościową opracowanych modeli oparto zatem na:

- porównaniu długości odcinków pomierzonych w rzeczywistości z wyznaczonymi na opracowanych testowych modelach, co pozwoliło na określenie dokładności wzajemnego położenia zamodelowanych obiektów. Pomiar odcinków wykonano dalmierzem laserowym oraz taśmą pomiarową. Przyjęto, że odcinki pomierzone zostały bezbłędne;
- określeniu na podstawie danych ze skaningu laserowego opisujących w sposób ciągły występujące w pomieszczeniu płaszczyzny np. ściany odstępstwa aproksymowanych z zastosowaniem zaproponowanych metod płaszczyzn od pozyskanych punktów pomiarowych opisujących analizowany element. (Borkowski, Józków, 2012)

Na podstawie analizy błędów (Tab.1) należy stwierdzić, że wnętrza pomieszczeń najdokładniej odtworzone

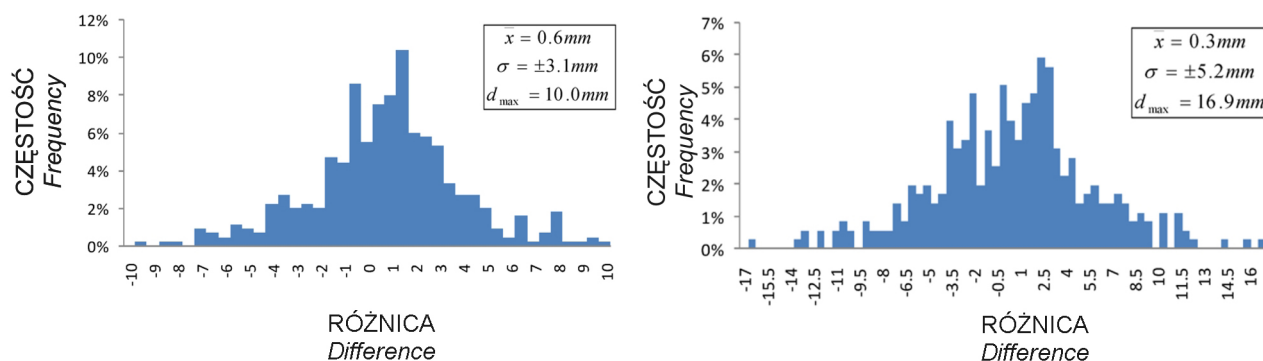
Tabela 1. Błędy średnie względnego położenia poszczególnych elementów pomieszczeń

Table 1. RMSE of relative position of the individual interior elements

Elementy <i>Elements</i>	RMSE [mm]	
	Fotogrametria <i>Photogrammetry</i>	Skaning Laser <i>Laser scanning</i>
Ściany <i>Walls</i>	3.3	5.0
Wysokość pomieszczeń <i>Height of room</i>	4.2	7.0
Meble <i>Furniture</i>	2.9	5.0
Infrastruktura informatyczna <i>Computer equipment</i>	3.1	7.5
Inne <i>Other</i>	3.4	6.0
Cały model <i>Whole 3D model</i>	3.1	6.0

zostały z wykorzystaniem danych pozyskanych za pomocą narzędzi i metod fotogrametrii naziemnej. Model opracowany na podstawie zbioru fotogrametrycznych danych wektorowych jest dwukrotnie dokładniejszy. Dane fotogrametryczne i zastosowana metodyka modelowania pozwoliły na odtworzenie z jednakową dokładnością prawie wszystkich elementów pomieszczeń.

Modele poszczególnych obiektów utworzone z zastosowaniem danych ze skaningu laserowego są bardziej zróżnicowane pod względem dokładnościowym. Najdokładniej odtworzono ściany oraz proste przedmioty takie jak meble. Dokładność ich zamodelowania wyniosła 5mm. Obiekty o skomplikowanej budowie takie jak infrastruktura teleinformatyczna i elektryczna zamodelowano z przeciętną dokładnością wynoszącą 7.0mm. Wyższa dokładność metod fotogrametrycznych spowodowana jest łatwością określenia za jej pomocą wszystkich



Ryc. 3. Histogramy różnic między odległościami pomierzonymi między punktami modelu, a punktami pomierzonymi bezpośrednio (a – fotogrametria, b – naziemny skaning laserowy).

Fig. 3. Histograms of the differences between distance measured on 3D model and directly in room (a – photogrammetry, b – terrestrial laser scanning).

Tabela 2. Dokładność aproksymacji płaszczyzn przyjętymi dwoma metodami.

Table 2. The accuracy of the plane approximation for two modeling methods.

Obiekt Object	Liczba punktów Number of points	Fotogrametria Photogrammetry			Skaning laserowy Laser scanning		
		Maksymalna odległość [mm] Maximum distance [mm]	Średnia odległość [mm] Average distance [mm]	δ [mm]	Maksymalna odległość [mm] Maximum distance [mm]	Średnia odległość [mm] Average distance [mm]	δ [mm]
1	55963	35.0	-3.2	6.5	27.4	-14.0	7.1
2	45091	51.4	6.5	5.2	41.7	5.0	5.1
3	22003	16.6	-0.2	5.5	23.9	8.2	5.2
4	12340	9.2	0.4	2.6	10.2	0.7	2.1
5	8972	22.3	7.6	4.4	19.3	-3.4	3.7
6	6142	7.6	0.6	1.9	7.8	1.4	1.6
7	8673	14.4	-6.6	3.4	10.9	-1.5	2.1
8	8288	20.0	7.7	5.5	17.7	5.5	4.5

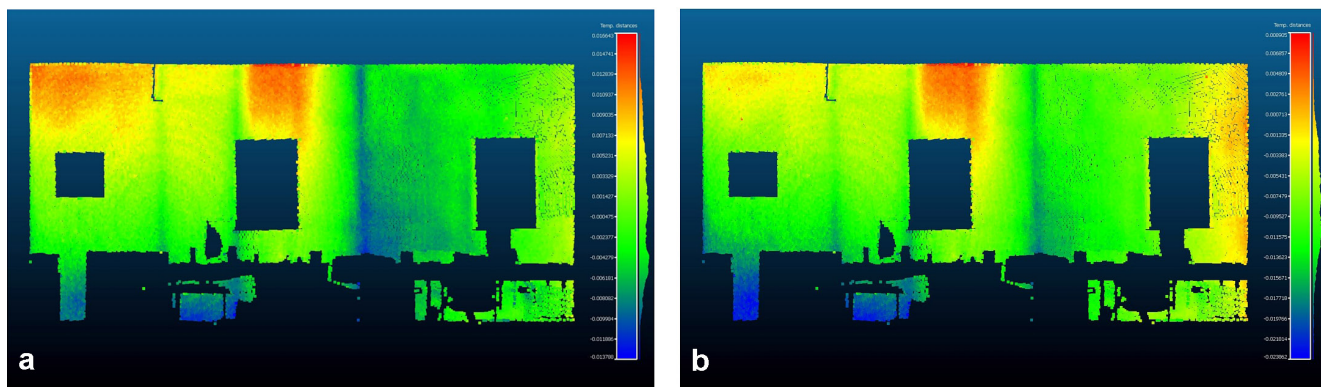
krawędzi obiektów, a co za tym idzie ich rzeczywistych rozmiarów. Na podstawie danych ze skaningu laserowego trudno było określić położenie krawędzi powierzchni utworzonej z płaszczyzną niewidoczną dla skanera (np. końcowa krawędź blatu) lub też zafalszowanej z powodu innego charakteru orientacji (pozioma lub pionowa) elementu znajdującego się w jej pobliżu (np. pionowa ściana). Dokładności uzyskane z obu metod potwierdzają możliwość ich zastosowania do tworzenia modeli wnętrza odpowiadających współczesnym standardom.

Histogramy różnic dla obu analizowanych modeli zaprezentowano na rycinie 3. Dla obu histogramów wartości średnie różnic są do siebie zbliżone. W przypadku różnic kontrolnych modelu z danych naziemnego skaningu laserowego maksymalna osiągnięta odchyłka jest o 6.9 mm większa niż w przypadku modelu z danych fotogrametrycznych. Na podstawie histogramów można również stwierdzić, że najczęściej odległości między sobą różniły się o 1mm dla modelu z danych fotogrametrycznych oraz 2 mm dla drugiego modelu.

Drugim etapem kontroli było przeanalizowanie dokładności odtworzenia płaszczyzn dla dwóch rozpatrywanych modeli. Do porównania wybrano osiem zamo-

delowanych na obu modelach płaszczyzn. Jednocześnie model powstały na podstawie danych ze zdjęć cyfrowych przetransformowano do układu modelu z danych TLS wykorzystując tarcze pomiarowe umieszczone na ścianach testowych pomieszczeń, co pozwoliło na użycie danych skanerowych jako referencja. W tabeli 2 zamieszczone zostały wyniki analizy generalizacji płaszczyzny względem punktów pomiarowych ją opisujących.

Aproksymacja płaszczyzn w obu przypadkach charakteryzowała się przeciętnym odchyleniem standardowym na poziomie 4.1mm dla modelu fotogrametrycznego i 3.5mm dla modelu z danych skanerowych. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że obie zastosowane metody modelowania płaszczyzn odtwarzały położenie płaszczyzn z jednakową dokładnością. Na rycinie 4. zaprezentowany został rozkład różnic między punktami referencyjnymi, a aproksymowaną płaszczyzną na jednym z testowanych obiektów. Widoczny na nich jest niejednorodny rozkład różnic spowodowany zniekształceniami występującymi w obrębie całej ściany, wynikającymi z lokalnych nierówności tynków i płyt gipsowych.



Ryc. 4. Różnice między punktami pomiarowymi, a płaszczyzną aproksymowaną z danych pozyskanych na podstawie zdjęć naziemnych (a) oraz danych ze skaningu laserowego (b).

Fig. 4. Differences between points cloud and planes approximated from data obtained from images (a) and laser scanning (b).

Podsumowanie

Współczesne techniki pomiarowe stanowią wspaniałe narzędzie do modelowania 3D pomieszczeń biurowych. Przy ich wykorzystaniu jesteśmy w stanie odtworzyć kształt i położenie 90% wszystkich obiektów znajdujących się w opracowywanym pomieszczeniu. Resztę obiektów należy pomierzyć metodami bezpośrednimi.

Wykorzystując narzędzia CAD mamy możliwość odtworzenia na podstawie pozyskanych danych prostych modeli zbudowanych z płaszczyzn i prostych brył. Uproszczona budowa modelu wpływa na zmniejszenie zakresu zajmowanej przestrzeni dyskowej, a jednocześnie umożliwia jego szybką nawigację i analizę.

Na podstawie uzyskanych wyników porównania należy stwierdzić, że modelowanie z wykorzystaniem metod fotogrametrycznych jest dokładniejsze od opracowania z użyciem metod skaningu laserowego. Proces opracowania modelu 3D z wykorzystaniem narzędzi fotogrametrii cyfrowej jest czterokrotnie bardziej czasochłonny od opracowania na podstawie danych skanerowych.

Biorąc pod uwagę wszystkie aspekty obu typów opracowań metody fotogrametryczne są dokładniejsze i tańsze, ale jednocześnie bardziej czasochłonne. Skaningu laserowego pomimo wysokich kosztów opracowania pozwala w krótkim czasie wykonać proces modelowania. Przy wyborze konkretnej metody należy zatem kierować się budżetem i czasem realizacji danego projektu.

W większości przypadków preferowanym rozwiązaniem powinien być skaningu laserowy pozwalający na uzyskanie dużej ilości danych przestrzennych, z której

w prosty sposób możemy wykonać model interesującego nas obiektu.

Literatura

- BORKOWSKI A., JÓŹKÓW G., 2012. *Ocena dokładności modelu 3D zbudowanego na podstawie danych skaningu laserowego – przykład Zamku Piastów Śląskich w Brzegu*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 23, ss. 37-47.
- FAN H., MENG L. 2009. *Automatic derivation of different levels of detail for 3D buildings modeled by CityGML*. Proceedings of the 24th International Cartographic Conference (ICC), Santiago, Chile, 15-22 Nov. 2009.
- GROGER G., KOLBE T.H., CZERWINSKI A., NAGEL C., 2008. *OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard*. Open Geospatial Consortium Inc.
- GREGOR G., PLUMER L., 2012. *CityGML – Interoperable semantic 3D city models*. ISPRS, Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 71, s. 12-33.
- KRASZEWSKI B., 2013. *Aspekty integracji modeli 3D budynków z bazą danych opisowych*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 25, ss. 95-105.
- KRASZEWSKI B., 2012. *Wykorzystanie naziemnego skaningu laserowego do inwentaryzacji pomieszczeń biurowych*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 23, ss. 187-196.
- LEE J., ZLATANOVA S., 2008. *A 3D data model and topological analyses for emergency response in urban areas*. Geospatial information technology for emergency response (ISPRS book series), Taylor & Francis Group, London, UK, ss. 143-168.



Mgr inż. Bartłomiej KRASZEWSKI, absolwent Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji Wojskowej Akademii Technicznej, obecnie asystent w Zakładzie Systemów Informacji Przestrzennej i Katastru IGiK. Zajmuje się wykorzystaniem danych fotogrametrycznych i skaningu laserowego do modelowania 3D. Dane adresowe: Instytut Geodezji i Kartografii, 00-689 Warszawa, ul. Modzelewskiego 27, e-mail: bartlomiej.kraszewski@igik.edu.pl, tel: 22 329 19 85.



Mgr inż. Paulina BRODOWSKA, absolwentka Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji Wojskowej Akademii Technicznej (specjalność geoinformatyka). Obecnie jest uczestniczką studiów doktoranckich w Wojskowej Akademii Technicznej, zajmuje się fotogrametrią, cyfrowym przetwarzaniem obrazu oraz archiwalnymi zdjęciami lotniczymi. Dane adresowe: Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji, Instytut Geodezji, Zakład Fotogrametrii i Teledetekcji, 00-908 Warszawa, ul. Sylwestra Kaliskiego 2, e-mail: pbrodowska@wat.edu.pl, tel: 22 683 71 48