



Modelowanie 3D obiektów zabytkowych z wykorzystaniem techniki wideo

PAULINA DELIŚ, MICHALINA WILIŃSKA, ANNA FRYŚKOWSKA

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji, Instytut Geodezji,
Zakład Teledetekcji i Fotogrametrii, 00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2,
pdelis@wat.edu.pl, m.wilinska@wat.edu.pl, afryskowska@wat.edu.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono proces opracowania trójwymiarowych modeli obiektów zabytkowych na przykładzie fasady kościoła św. Anny w Warszawie. Zaprezentowano również przykłady modeli 3D opracowanych z danych wideo obiektów znajdujących się we wnętrzu kościoła. Dane pozyskano kamerą wideo z obiektywem o stałej ogniskowej $f = 16$ mm. Zastosowanie w kamerze stałogniskowego obiektywu umożliwiło wyznaczenie elementów orientacji wewnętrznej w procesie kalibracji kamery wideo, a tym samym usunięcie wpływu dystorsji. Trójwymiarowe modele obiektów wygenerowano w oprogramowaniu *Topcon Image Master*. Opracowanie modelu 3D na podstawie danych wideo obejmowało następujące etapy: pozyskanie danych, wybór klatek wideo do procesu orientacji, orientacja klatek wideo z wykorzystaniem punktów o znanych współrzędnych z naziemnego skaningu laserowego oraz parametrów kamery wyznaczonych w procesie kalibracji, utworzenie modelu szkieletowego poprzez wskazanie na obrazach epipolarnych elementów obiektu, generowanie modelu w formacie TIN. Do przeprowadzenia oceny dokładności modeli 3D obiektów wykorzystano dane z naziemnego skaningu laserowego. Dokładność trójwymiarowych modeli obiektów zabytkowych wygenerowanych z danych wideo względem danych naziemnego skaningu laserowego wyniosła $\pm 0,05$ m.

Słowa kluczowe: fotogrametria naziemna, wideo, naziemny skaningu laserowy, trójwymiarowy model obiektu, obiekty zabytkowe

1. Wstęp

Obiektem zabytkowym wg Józefa Jachimskiego [4] nazywamy zabytek materialnej kultury człowieka. W celu zapewnienia właściwej ochrony zabytków, a także zachowania ich autentyczności, niezbędne jest przeprowadzenie kompleksowej inwentaryzacji obiektu. Inwentaryzacja obiektu zabytkowego polega na określeniu

rodzaju, kształtu, wymiarów oraz położenia przestrzennego danego zabytku. Według Rozporządzenia Ministra Gospodarki Przestrzennej i Budownictwa z dnia 21 lutego 1995 r. w sprawie rodzaju i zakresu opracowań geodezyjno-kartograficznych czynności geodezyjnych obowiązujących w budownictwie [11], na inwentaryzację architektoniczno-budowlaną obiektu zabytkowego składają się: dokumentacja opisowa, dokumentacja pomiarowo-kartograficzna, dokumentacja fotograficzna oraz dokumentacja fotogrametryczna. Jedną z form dokumentacji fotogrametrycznej jest trójwymiarowy model obiektu.

2. Klasyfikacja metod modelowania 3D

Do pomiaru obiektu zabytkowego w celu opracowania dokumentacji 3D doskonale nadają się metody pomiaru bezkontaktowego. Metody kontaktowe, wykorzystujące tradycyjne przyrządy geodezyjne, są nie tylko czasochłonne, lecz także często ich zastosowanie jest niemożliwe ze względu na utrudniony lub całkowity brak bezpośredniego dostępu do mierzonego obiektu. Metody bezkontaktowe uznawane za bezinwazyjne są bezpieczne dla substancji zabytkowej, co z punktu widzenia konserwatorów zabytków jest niezwykle istotne. Przyjęto następujący podział bezkontaktowych metod modelowania 3D [8]:

- metody wizualizacji 3D z wykorzystaniem obrazów „IBR” (ang. *Image Based Rendering*),
- metody modelowania 3D na podstawie obrazów „IBM” (ang. *Image Based Modeling*),
- metody modelowania 3D na podstawie danych z sensorów aktywnych, tj. skanerów laserowych „RBM” (ang. *Range Based Modeling*),
- kombinacja metod modelowania 3D „IBM” i „RBM”.

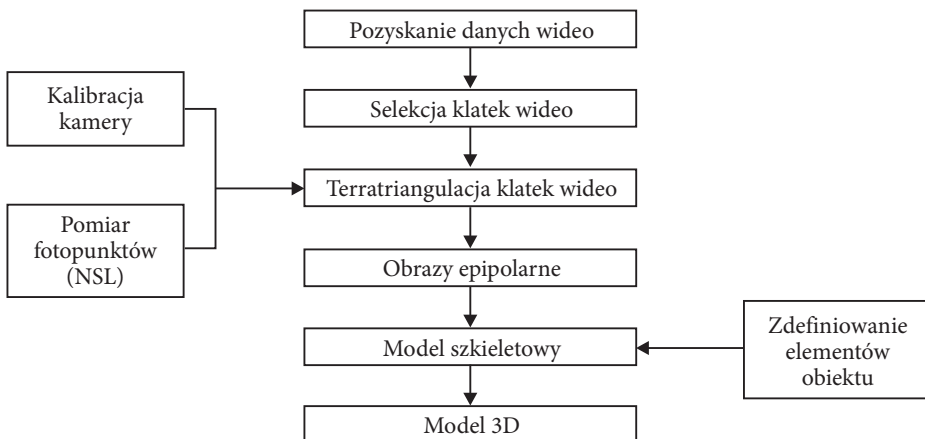
Metoda IBR nie obejmuje opracowania modelu 3D, lecz umożliwia generowanie widoków wirtualnych. Wymaga znajomości współrzędnych środków rzutów kamery. Przy braku takich danych konieczne jest posiadanie dużej liczby zdjęć o znacznym pokryciu [10]. W metodzie IBM, w celu wyznaczenia współrzędnych 3D każdego punktu na obiekcie, wykorzystuje się geometrię stereogramu. Powszechnie używanym narzędziem do pozyskiwania danych w tej metodzie była analogowa kamera fotogrametryczna, coraz częściej wypierana przez niemetryczne kamery cyfrowe [6]. Metoda RBM polega na pozyskaniu bezpośrednio informacji 3D o obiekcie, dzięki wykorzystaniu sensorów aktywnych, tj. skanerów 3D, których działanie opiera się wykorzystaniu wiązki lasera. Produkty naziemnego skaningu laserowego charakteryzują się dużą dokładnością, ale przy tym są kosztowne. W przypadku obiektów o dużych rozmiarach i złożonym kształcie, jakimi często charakteryzują się zamki czy pałace, pomiar NSL jest czasochłonny. Ze względu na czas i złożoność pomiarów w literaturze coraz częściej opisywane są techniki integrujące metody IBM

i RBM [8, 9]. W rozwiązaniach tych podstawowe kształty obiektów modelowane są z wykorzystaniem obrazów z kamery cyfrowej, natomiast wnętrza oraz detale architektoniczne są mierzone metodą naziemnego skaningu laserowego.

Przedstawione w niniejszym artykule badania opierają się na założeniu, że możliwe jest opracowanie modelu 3D obiektu zabytkowego na podstawie danych wideo. Zaproponowana metoda opracowania modelu 3D obiektu na podstawie obrazów wideo należy do grupy metod IBM. Niewątpliwą zaletą techniki wideo na etapie prac terenowych jest pozyskiwanie w krótkim czasie całej sekwencji obrazów, a nie, jak w przypadku kamery cyfrowej, pojedynczego obrazu. Dzięki temu wybór obrazów wideo, które zostaną wykorzystane w procesie orientacji z uwzględnieniem odpowiedniego stosunku bazowego, odbywa się na etapie prac kameralnych. W rezultacie wpływa to na skrócenie czasu trwania pomiarów, co w przypadku obiektów zabytkowych jest szczególnie istotne ze względu na często ograniczony dostęp do tego rodzaju obiektów. Metoda wykorzystująca obrazy wideo stanowi także alternatywę dla kosztownej i czasochłonnej techniki naziemnego skaningu laserowego.

3. Metodyka opracowania Numerycznego Modelu Obiektu na podstawie danych wideo

W aspekcie modelowania trójwymiarowego dane wideo są wykorzystywane zazwyczaj do automatycznego modelowania obiektów w stosunkowo krótkim czasie [2, 3]. Niestety, dokładność modeli obiektów wygenerowanych automatycznie jest zbyt niska i z pewnością nie nadaje się do wykorzystania dla potrzeb dokumentacji architektonicznej. W celu uzyskania większej dokładności pomiaru należy zastosować metodę interaktywną.



Rys. 1. Schemat procesu modelowania 3D na podstawie danych wideo

Proponowana metoda opracowania modelu trójwymiarowego na podstawie danych wideo obejmuje następujące etapy: pozyskanie danych, wybór klatek wideo do procesu orientacji, orientacja klatek wideo z wykorzystaniem punktów o znanych współrzędnych 3D z naziemnego skaningu laserowego oraz parametrów kamery wyznaczonych w procesie kalibracji, utworzenie modelu szkieletowego poprzez wskazanie na obrazach epipolarnych elementów obiektu i finalnie wygenerowanie modelu w formacie TIN.

Metodykę opracowania trójwymiarowego modelu z danych wideo przedstawiono na przykładzie fasady kościoła św. Anny w Warszawie. W dalszej części artykułu zaprezentowane zostały wygenerowane z danych wideo modele 3D obiektów znajdujących się wewnątrz świątyni — ambony oraz kuli zdobiącej wejście do jednej z bocznych kaplic. Do pozyskania danych wykorzystano kamerę wideo *Sony Handycam NEX-VG10E*. Modele 3D obiektów wykonano w programie *Image Master*, natomiast do oceny ich dokładności wykorzystano program *PolyWorks*.

3.1. Kalibracja kamery wideo

Pozyskanie danych wideo powinno być poprzedzone procesem kalibracji kamery. Kalibrację kamery wideo wykonano w programie *Image Master Calib* w oparciu o dołączony do niego test kalibracyjny 2D. Elementy orientacji wewnętrznej obiektywu badanej kamery wideo wyznaczono niezależnie dla 10 zestawów klatek wideo. Poniżej znajduje się tabela zawierająca wartości odchyień standardowych obliczonych dla poszczególnych elementów orientacji wewnętrznej obiektywu kamery *Sony Handycam NEX-VG10E*.

TABELA 1
Odchylenia standardowe elementów orientacji wewnętrznej obiektywu kamery wideo

	f	x_0	y_0	$k1$	$k2$	$p1$	$p2$
σ	$\pm 0,007$ mm	$\pm 0,042$ mm	$\pm 0,024$ mm	$\pm 0,000018$	$\pm 0,000001$	$\pm 0,000038$	$\pm 0,000020$

Niewielkie wartości odchyień standardowych rzędu setnych (współrzędne punktu głównego) i tysięcznych (odległość obrazowa) części milimetra potwierdzają stabilność geometrii obiektywu kamery. W przypadku współczynników dystorsji obiektywu powtarzalność wyników okazała się również wysoka.

3.2. Pozyskanie danych

Dane wideo pozyskano przy użyciu obiektywu szerokokątnego o stałej ogniskowej $f = 16$ mm z serii *Sony Alpha NEX*. Zastosowanie stałogniskowego obiektywu umożliwiło wyznaczenie elementów orientacji wewnętrznej, ze szczególnym

uwzględnieniem dystorsji obiektywu, co tym samym wyeliminowało część ograniczeń związanych z wykorzystaniem kamery wideo w fotogrametrii, dotyczących niezajomości oraz niestabilności elementów orientacji wewnętrznej, a także znacznej dystorsji, jaką zwykle jest obarczony obiektyw kamery wideo [2]. Wykonując film wideo obiektu należy pamiętać o zachowaniu stałości odległości kamery od obiektu. Ważne jest również zapewnienie takiej prędkości zmiany pozycji kamery, aby na klatkach wideo nie był widoczny efekt rozmycia.

W badaniach wykorzystano również dane naziemnego skaningu laserowego, pozyskane skanerem impulsowym *Leica ScanStation 2*. Na podstawie wcześniejszych opracowań (Kędzierski et al., 2010) przyjęto, że na dokładność danych naziemnego skaningu laserowego największy wpływ mają trzy parametry: teoretyczna dokładność pomiaru skanerem *Leica ScanStation 2* m_{TLS} , rozdzielczość chmury punktów p_{res} i błąd orientacji wzajemnej chmur punktów pozyskanych z kolejnych stanowisk skanera m_{ori} .

Błąd średni położenia punktu m_{pos} pomierzonego naziemnym skanerem laserowym został obliczony na podstawie poniższego wzoru (1):

$$m_{\text{pos}} = \sqrt{m_{\text{TLS}}^2 + p_{\text{res}}^2 + m_{\text{ori}}^2}. \quad (1)$$

Uwzględniając, że teoretyczna dokładność pomiaru skanerem *Leica ScanStation 2* $m_{\text{TLS}} = \pm 0,006$ m, rozdzielczość chmury punktów $p_{\text{res}} = 0,015$ m i błąd orientacji wzajemnej $m_{\text{ori}} = \pm 0,036$ m, błąd średni położenia punktu naziemnego skaningu laserowego dla fasady kościoła św. Anny w Warszawie wyniósł $m_{\text{pos}} = \pm 0,04$ m.

Chmura punktów pomierzona naziemnym skanerem laserowym stanowiła model referencyjny służący do oceny dokładności modelu 3D opracowanego z danych wideo. Ponadto, wybrane z chmury punkty zostały wykorzystane w procesie orientacji klatek wideo jako fotopunkty.

3.3 Selekcja klatek wideo

Do opracowania modelu 3D obiektu wykorzystano klatki wideo. Tworzyły one stereogramy, które następnie zostały poddane orientacji. Zatem ważne było zachowanie odpowiedniego stosunku bazowego. Przy wyborze klatek wideo wykorzystano poniższą zależność, która zakłada, że pokrycie poprzeczne pomiędzy kolejnymi wykorzystanymi do orientacji klatkami wideo powinno wynosić 60% (Deliś, 2012):

$$Q = \frac{2 P_s \cdot d}{5 f \cdot v} \cdot L_H \cdot I, \quad (2)$$

gdzie: Q — n -ta klatka wideo wykorzystana do generowania modelu 3D;

- P_s — wymiar piksela na obrazie;
- d — odległość od obiektu;
- f — ogniskowa obiektywu;
- v — prędkość przesuwu kamery;
- L_H — liczba pikseli matrycy kamery wideo w kierunku poziomym;
- I — liczba klatek na sekundę.

Uwzględniając parametry, takie jak rozmiar piksela w układzie obrazowym kamery $P_s = 10,8 \mu\text{m}$, odległość kamery od obiektu $d = 12 \text{ m}$, ogniskową obiektywu $f = 16 \text{ mm}$, prędkość ruchu kamery $v = 0,12 \text{ m/s}$, liczbę pikseli matrycy kamery wideo w kierunku poziomym $L_H = 1024$ oraz liczbę pozyskiwanych przez kamerę klatek na sekundę $I = 25$, obliczono, że do opracowania modelu 3D obiektu należy wykorzystać w przybliżeniu co 690 klatkę wideo.

3.4. Terratriangulacja klatek wideo

Do opracowania trójwymiarowego modelu obiektu niezbędna jest znajomość elementów orientacji zewnętrznej, tj. położenia kamery wideo i kątów jej nachylenia w momencie pozyskiwania danych. Proces terratriangulacji klatek wideo opierał się na wyrównaniu metodą niezależnych wiązek. Metoda ta uwzględnia wszelkie dostępne informacje o kamerze i opracowywanych zdjęciach, m.in. elementy orientacji wewnętrznej, położenie kamery, współrzędne obrazowe i terenowe fotopunktów, współrzędne obrazowe punktów wiążących. Zastosowana metoda jest uznawana za najdokładniejszą i najczęściej wykorzystywaną w fotogrametrii (Luhmann et al., 2006).



Rys. 2. Rozmieszczenie punktów na wyselekcjonowanych klatkach wideo

Do orientacji obrazów wideo wykorzystano 14 fotopunktów z naziemnego skaningu laserowego oraz 13 punktów wiążących poszczególne zdjęcia stereogramów. Rozmieszczenie punktów na klatkach wideo przedstawiono na rysunku nr 2.

Zestawienie wyników terratriangulacji wyselekcjonowanych klatek wideo przedstawiono w tabeli 2, natomiast elementy orientacji zewnętrznej zdjęć zostały zamieszczone w tabeli 3.

TABELA 2

Wyniki terratriangulacji wyselekcjonowanych klatek wideo

Stereogram	P_y [μm]	S_{py} [μm]	Baza B [m]	Odległość do obiektu H [m]	B/H	Rozdzielczość XZ [m]	Rozdzielczość Y [m]
1-2	4,2	1,3	3,750	11,910	0,31	0,008	0,025
2-3	4,4	2,8	4,533	12,081	0,38	0,008	0,022
3-4	3,7	2,5	4,304	12,249	0,35	0,008	0,023
4-5	2,4	2,2	4,001	12,400	0,32	0,008	0,026
5-6	3,1	2,1	3,721	12,581	0,30	0,008	0,029

TABELA 3

Elementy orientacji zewnętrznej wyznaczone w procesie terratriangulacji

Nr zdjęcia	X_0 [m]	Y_0 [m]	Z_0 [m]	ω	φ	κ
1	-7,601	-6,172	0,018	-96°57'14,4"	1°08'34,8"	-113°42'25,2"
2	-6,892	-9,471	-0,020	-95°54'46,8"	0°43'55,2"	-111°02'38,4"
3	-6,231	-13,132	-0,096	-98°28'44,4"	-0°54'36,0"	-109°07'19,2"
4	-5,709	-17,098	-0,160	-97°59'16,8"	0°08'27,6"	-108°36'39,6"
5	-5,202	-21,372	-0,207	-98°47'56,4"	1°18'46,8"	-111°56'56,4"
6	-4,571	-25,861	-0,212	-99°27'21,6"	1°02'56,4"	-101°00'10,8"

TABELA 4

Współrzędne fotopunktów oraz ich poprawki po wyrównaniu

Nr punktu	X [m]	Y [m]	Z [m]	D_X [mm]	D_Y [mm]	D_Z [mm]
1	-20,357	-4,730	1,525	-0,8	-3,0	-3,7
2	-20,576	-5,025	-0,839	0,2	4,2	3,1
3	-19,383	-13,693	3,711	1,1	-12,3	3,9
4	-19,109	-9,673	1,778	-1,8	7,9	-5,9
5	-17,403	-17,218	5,637	5,9	-4,9	0,4

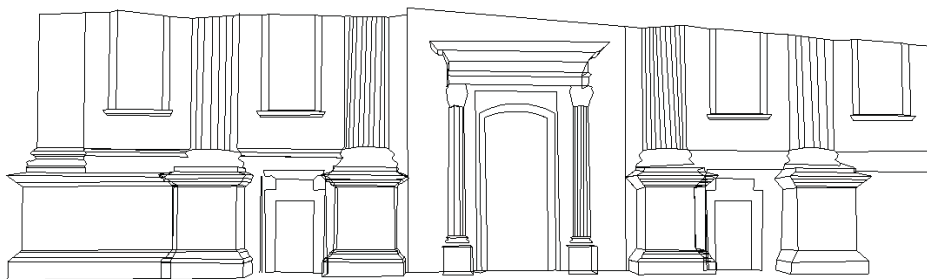
cd. tabeli 4

6	-17,413	-16,488	1,539	-4,4	7,1	7,0
7	-17,521	-16,437	-1,121	-1,0	4,1	0,4
8	-16,829	-22,370	-0,639	-2,8	-6,4	1,1
9	-16,368	-22,633	5,591	-12,2	19,0	-11,5
10	-16,090	-23,313	1,500	16,5	-17,8	13,7
11	-15,747	-25,799	-1,095	-0,3	0,3	-4,9
12	-14,859	-30,463	-1,088	1,2	-4,1	-6,1
13	-16,082	-30,788	3,569	6,9	-4,4	4,3
14	-15,365	-34,875	2,402	-8,6	10,2	-1,8
				RMS_x [mm]	RMS_y [mm]	RMS_z [mm]
				6,6	9,2	6,1
				S_x [mm]	S_y [mm]	S_z [mm]
				6,9	9,6	6,4

Wyniki terratriangulacji klitek wideo można uznać za poprawne. Zarówno wartości szczytkowe paralaksy poprzecznej p_y , jak i jej odchylenie standardowe S_{py} dla punktów wiążących nie przekraczają wartości rozmiaru piksela w układzie współrzędnych obrazowych, natomiast średnie wartości odchyżeń standardowych S_x , S_y , S_z oraz błędy RMS_x , RMS_y , RMS_z na fotopunktach nie przekraczają 1 cm. Błąd średni wyznaczenia współrzędnych punktu wiążącego wyniósł $\pm 7,3$ mm.

3.5. Zdefiniowanie elementów obiektu

Dzięki temu, że w wyniku przeprowadzenia terratriangulacji klitek wideo wpływ paralaksy poprzecznej zostaje zminimalizowany do wartości poniżej 1 piksela, na powstałych obrazach epipolarnych możliwy staje się pomiar 3D punktów oraz linii opisujących geometrię obiektu. W ten sposób powstał model szkieletowy obiektu.



Rys. 3. Model szkieletowy fasady kościoła św. Anny w Warszawie

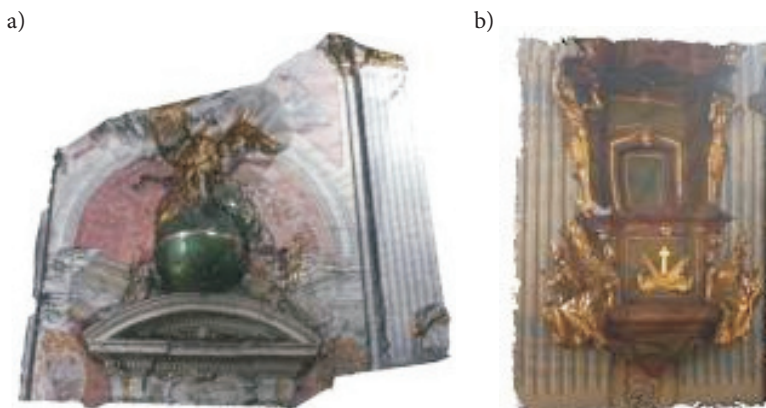
3.6. Generowanie modelu TIN

W oparciu o model szkieletowy wygenerowano trójwymiarowy model 3D fasady w postaci siatki TIN. Elementy obiektu podzielono na dwie grupy: płaszczyzny, czyli ściany fasady, dla których wygenerowano model TIN o rozmiarze oczka siatki równym 0,05 m, oraz powierzchnie, tj. — rzeźby, gzymsy itp., dla których model TIN wygenerowano za pomocą metody LSM (ang. *Least Square Matching*). Rozmiar okna pierwotnego ustalono na 15 pikseli, natomiast rozmiar okna poszukiwawczego wyniósł 101 pikseli. Rozmiar oczka siatki TIN dla powierzchni ustalono na 0,01 m. Filtrację punktów modelu 3D wykonano za pomocą filtru medianowego.



Rys. 4. Model 3D fasady kościoła św. Anny w Warszawie w formacie TIN: a) bez tekstury; b) z nałożoną teksturą

Poniżej przedstawiono modele 3D obiektów znajdujących się we wnętrzu kościoła św. Anny opracowane na podstawie klatek wideo.



Rys. 5. Modele 3D opracowane na podstawie danych wideo: a) kula zdobiąca wejście do jednej z kaplic; b) ambona

4. Analiza dokładności modelu 3D fasady kościoła św. Anny

Analizę dokładności opracowanego modelu trójwymiarowego wykonano za pomocą modułu *IMInspect* oprogramowania *PolyWorks*. Wykorzystano w tym celu chmurę punktów naziemnego skaningu laserowego, która stanowiła model referencyjny. Do wyznaczenia wartości odchyłek pomiędzy modelami zastosowano metodę najkrótszej odległości. Metoda ta polega na obliczeniu odległości minimalnej d pomiędzy punktami z naziemnego skanowania laserowego i modelu 3D opracowanego na podstawie danych wideo. Analizę odchyłek modeli wykonano dla dwóch stopni szczegółowości modeli: dla pełnego modelu 3D fasady oraz na przykładzie jednej z rzeźb. Wyniki oceny dokładności z raportów wygenerowanych przez moduł *IMInspect* przedstawiono w tabeli 5.

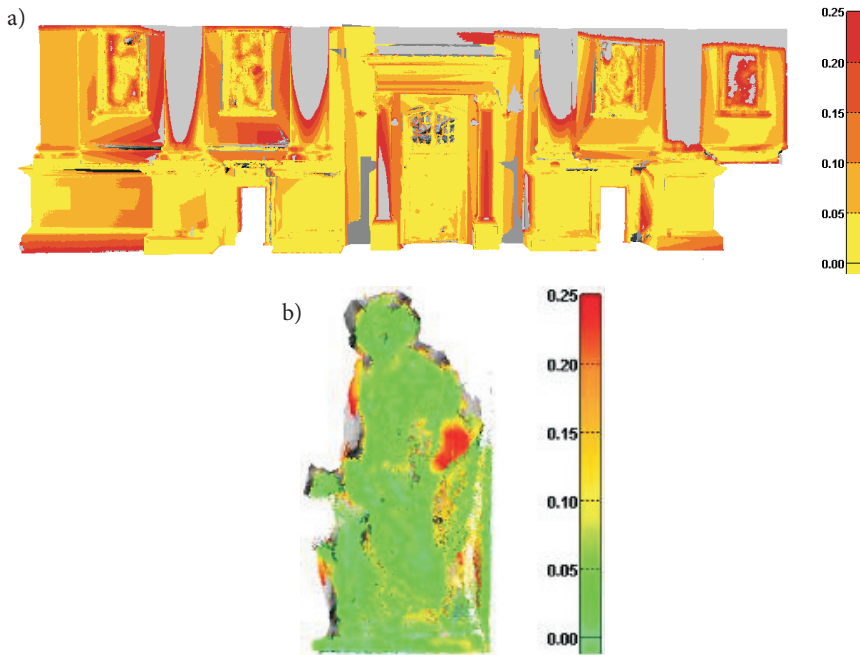
TABELA 5

Wyniki analizy dokładności modelu 3D opracowanego na podstawie danych wideo względem chmury punktów z naziemnego skaningu laserowego

Model 3D		Fasada	Rzeźba
liczba punktów z naziemnego skaningu laserowego		7165 tys.	51 tys.
d_{mean}		0,026 m	0,024 m
RMSE		0,21 m	0,05 m
odchylenie standardowe S		0,21 m	0,04 m
S_{max}		1,83 m	0,23 m
procent punktów w zakresie	$\pm 1\sigma$	83%	78%
	$\pm 2\sigma$	92%	93%
	$\pm 3\sigma$	97%	98%

Błąd średni dla całego modelu wyniósł $\pm 0,21$ m. Na tak dużą wartość błędów mają wpływ odchyłki występujące dla części modeli przedstawiających kolumny. Dlatego wykonano także analizę porównawczą na wybranym fragmencie modelu 3D. Jako fragment wybrano jedną z rzeźb fasady. Średnia odległość pomiędzy punktami modelu z naziemnego skaningu laserowego a modelem 3D opracowanym na podstawie klitek wideo d_{mean} wynosi 0,024 m, natomiast maksymalne odchylenie standardowe S_{max} wynosi 0,23 m.

Rysunek 6 przedstawia wizualizację graficzną odchyłek modelu 3D wygenerowanego z danych wideo względem chmury punktów z naziemnego skaningu laserowego.



Rys. 6. Wartości odchyłek modelu 3D z danych wideo względem chmury punktów z naziemnego skaningu laserowego: a) dla całego modelu 3D; b) dla jednej z rzeźb fasady. Wartości odchyłek podane w [m]

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono proces trójwymiarowego modelowania obiektów zabytkowych na podstawie danych wideo na przykładzie fasady kościoła św. Anny w Warszawie. W procesie terratriangulacji wyselekcjonowanych klitek wideo otrzymano średnie wartości odchyłek standardowych S_x , S_y , S_z na fotopunktach

poniżej 1 cm oraz wartości *RMS* w układzie współrzędnych obrazowych poniżej 1 piksela. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że zastosowanie jako osnowy punktów z naziemnego skaningu laserowego pomierzonych z błędem średnim $m_{pos} = \pm 0,04$ m pozwala na przeprowadzenie terratriangulacji z wystarczającą dokładnością. Orientowane w ten sposób klatki wideo mogą być bazą do wygenerowania trójwymiarowych modeli fasad obiektów zabytkowych w postaci siatki TIN o dokładności $\pm 0,05$ m. Przeprowadzone badania wykazały, że przy założeniu pewnych warunków technika wideo może być z powodzeniem wykorzystywana do modelowania 3D obiektów zabytkowych. Ponadto może stanowić uzupełnienie bądź alternatywę dla drogiego sprzętu do naziemnego skaningu laserowego.

Artykuł wpłynął do redakcji 28.06.2013 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 5.03.2014 r.

LITERATURA

- [1] DELIŚ P., *Integracja danych z Naziemnego Skaningu Laserowego i danych obrazowych pozyskanych kamerą wideo*, Biul. WAT, 4, 2012, 39-54.
- [2] FRAHM J.M., POLLEFEYS M., CLIPP B., GALLUP D., RAGURAM R., WU C.C., ZACH C., *3D reconstruction of architectural scenes from uncalibrated video sequences*, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences, 38, 5, 2009.
- [3] FITZGIBBON A.W., ZISSERMAN A., *Automatic 3D model acquisition and generation of new images from video sequences*, European Signal Processing Conference, 1998, 311-326.
- [4] JACHIMSKI J., *Fotogrametryczna inwentaryzacja obiektów zabytkowych*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 7, 1997, 53-60.
- [5] KĘDZIERSKI M., WILIŃSKA M., FRYŠKOWSKA A., *Opracowanie ortofoto obiektu zabytkowego metodami fotogrametrii bliskiego zasięgu z wykorzystaniem naziemnego skaningu laserowego*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 21, 2010, 149-158.
- [6] KWOCZYŃSKA B., PŁACZEK Ł., *Zastosowanie niometrycznego aparatu cyfrowego Canon EOS 300D do wizualizacji 3D obiektu architektonicznego*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 16, 2006, 395-402.
- [7] LUHMANN T., ROBSON S., KYLE S., HARLEY I., *Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications*, Whittles Publishing, Dunbeth, 2006, 448-458.
- [8] REMONDINO F., EL-HAKIM S., *Image-Based 3D modeling: A review*, The Photogrammetric Record, 21, 115, 2006, 269-291.
- [9] REMONDINO F., RIZZI A., *Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites — techniques, problems, and examples*, Applied Geomatics, 2, 3, 2010, 85-100.
- [10] SHUM H.Y., KANG S.B., *A review of image-based rendering techniques*, Proceedings of IEEE/SPIE Visual Communications and Image Processing (VCIP), 213, 2000.
- [11] Rozporządzenie Ministra Gospodarki Przestrzennej i Budownictwa z dnia 21 lutego 1995 r. w sprawie rodzaju i zakresu opracowań geodezyjno-kartograficznych czynności geodezyjnych obowiązujących w budownictwie.
- [12] Topcon, *Podręcznik do oprogramowania Image Master*, 2007.

P. DELIŚ, M. WILIŃSKA, A. FRYŚKOWSKA

3D modelling of cultural heritage objects using video technology

Abstract. In the paper, the process of creating 3D models of St. Anne's Church's facades is described. Some examples of architectural structures inside of St. Anne's Church's are presented. Video data were acquired with the fixed focal length lens $f = 16$ mm. It allowed to determine interior orientation parameters in a calibration process and to remove an influence of distortion. 3D models of heritage objects were generated using the Topcon Image Master software. The process of 3D model creating from video data involved the following steps: video frames selection for the orientation process, orientation of video frames using points with known coordinates from Terrestrial Laser Scanning, wireframe and TIN model generation. In order to assess the accuracy of the developed 3D models, points with known coordinates from Terrestrial Laser Scanning were used. The accuracy analysis showed that the accuracy of 3D models generated from video images is ± 0.05 m.

Keywords: terrestrial photogrammetry, video, terrestrial laser scanning, 3D model, heritage objects

