



## Aspekty pozyskiwania danych z Naziemnego Skaningu Laserowego

MICHAŁ KĘDZIERSKI, PIOTR WALCZYKOWSKI,  
ANNA FRYŚKOWSKA

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,  
Zakład Teledetekcji i Fotogrametrii, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

**Streszczenie.** Ostatnio coraz więcej uwagi poświęca się dokumentacji architektonicznej obiektów zabytkowych, zwłaszcza gdy są one obiektami kultu religijnego. Dane pozyskane z Naziemnego Skaningu Laserowego (NSL) pozwalają na wykonanie różnorodnych produktów i opracowań architektonicznych. Między innymi model elewacji i rysunek wektorowy powstały na bazie trójwymiarowego modelu są często wykorzystywane przez architektów i konserwatorów zabytków. W większości przypadków służą one jako dokumentacja niezbędna do odtworzenia stanu faktycznego obiektu przed renowacją, wykonania rysunków 2D, wizualizacji lub odtworzenia geometrii obiektu.

W artykule przedstawiono wybrane aspekty pozyskiwania i przetwarzania danych z naziemnego skaningu laserowego na przykładzie opracowania zabytkowego kościoła drewnianego w Żukowie. Pomiary zostały wykonane skanerem impulsowym ScansStation2.

**Słowa kluczowe:** naziemny skaningu laserowy, fotogrametria bliskiego zasięgu, modelowanie 3D, zabytki, dokumentacja architektoniczna

**Symbole UKD:** 528.7

### 1. Wstęp — metody pozyskiwania danych 3D

Dane przestrzenne dotyczące obiektów świata rzeczywistego odgrywają coraz większą rolę w odtwarzaniu kształtu lub opracowaniu np. przestrzennych modeli miast. Do tej pory dane takie pozyskiwane były na podstawie bloku zdjęć o konkretnym pokryciu. Jednak dokładność takich opracowań jest dużo niższa, niż jest to w przypadku najnowocześniejszych metod pomiarowych takich jak NSL. Umożliwia on dokładną wizualizację, rekonstrukcję czy też tworzenie dokumentacji architektonicznej obiektów budowlanych lub inżynierskich w bardzo krótkim

czasie. Obecnie większość modeli 3D opartych jest na danych pochodzących z bezkontaktowych metod pomiaru, czyli fotografii cyfrowej i NSL. W przypadku tej ostatniej, w wyniku pomiaru uzyskuje się chmurę punktów o znanych współrzędnych przestrzennych.

## **2. Zastosowania Naziemnego Skaningu Laserowego w architekturze**

NSL znajduje swoje zastosowania głównie w architekturze, inżynierii drogowej, czy przemysłowej. Ostatnio coraz więcej uwagi poświęca się dokumentacji architektonicznej obiektów zabytkowych, zwłaszcza gdy są one obiektami kultu religijnego. Dane pozyskane z NSL pozwalają na wykonanie różnorodnych produktów i opracowań architektonicznych. Między innymi model elewacji i rysunek wektorowy powstały na bazie trójwymiarowego modelu coraz częściej są wykorzystywane przez architektów i konserwatorów zabytków. W większości przypadków służą one jako dokumentacja niezbędna do odtworzenia stanu faktycznego obiektu przed renowacją, wykonania rysunków 2D, wizualizacji lub odtworzenia geometrii obiektu.

W Polsce zasady inwentaryzacji architektonicznej regulują wytyczne techniczne G-3.4. Przewidują one, jakie są wymagane materiały i informacje o stanie aktualnym obiektu, które będą mogły być później wykorzystane w pracach projektowych i technicznych służących ochronie zabytków. Z istniejących metod, skaningu laserowego jako jedyna tak precyzyjna technologia zapewnia szybkie i bardzo szczegółowe stworzenie dokumentacji architektonicznej. W artykule przedstawione zostaną wyniki badań nad wykorzystywaniem naziemnego skaningu laserowego do celów inwentaryzacji architektonicznej na przykładzie drewnianego kościoła zabytkowego.

## **3. Skanowanie obiektu zabytkowego**

Prace badawcze wykonano skanerem Leica ScanStation2, należącym do rodziny skanerów Leica Geosystems HDS. Jest to uniwersalny skaner impulsowy o zasięgu kilkuset metrów pozwalający na wykonywanie pomiarów 3D z milimetrową precyzją. Wysoka produktywność ScanStation2 jest zapewniona poprzez dużą dokładność wyznaczenia pozycji (6 mm), pomiaru odległości (4 mm), a przede wszystkim niespotykaną dotąd zdolność zagęszczenia ścieżki skanowania poniżej 1 mm. Takie rozwiązanie jest szczególnie przydatne przy precyzyjnych pomiarach niewielkich elementów architektonicznych. Przewagą systemu jest również możliwość wizualnego umiejscowienia pojedynczego, specyficznego

punktu czy wybranego elementu obiektu na badanej powierzchni i wykonanie bardzo dokładnego pomiaru tego elementu. Kompletny system skanera wraz z wbudowaną kamerą cyfrową (o rozdzielczości 6.4 mln pikseli) sterowany jest z wykorzystaniem oprogramowania Cyclon 5.8. Wykorzystując zamontowany system optyczny, w tym zwierciadło obrotowe i możliwość pracy w dwóch oknach pomiarowych, pole widzenia skanera jest bardzo duże ( $360 \times 270$  stopni). Prędkość skanowania to maksymalnie 50 000 punktów na sekundę, zaś zasięg 300 m, ale doświadczenia wykazały praktyczne możliwości o ok. 50% wartości maksymalnych do osiągnięcia.

### **3.1. Pozyskanie i przetwarzanie danych 3D w celu wykonania dokumentacji architektonicznej obiektu sakralnego**

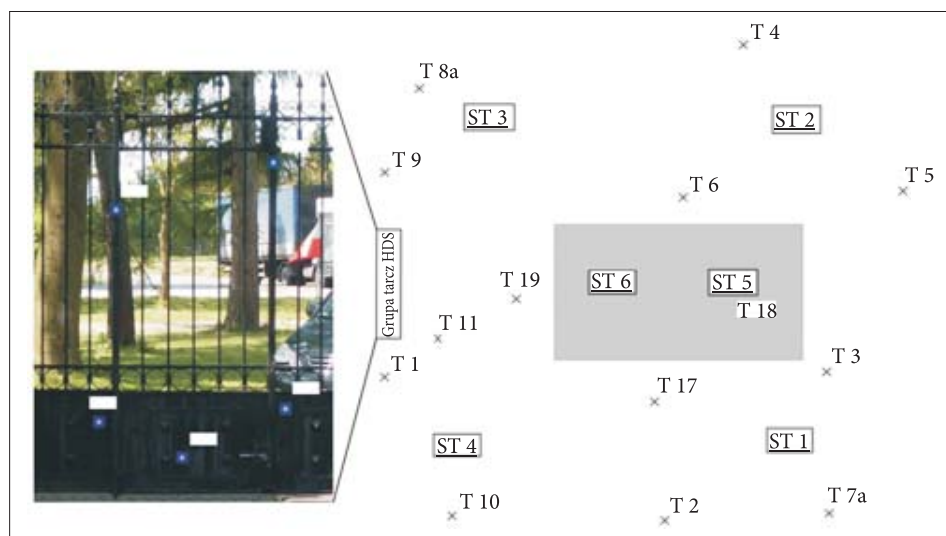
Dane zostały pozyskane na podstawie pomiaru zabytkowego kościoła drewnianego, znajdującego się w Żukowie k. Warszawy, który jest obiektem o tradycji sięgającej XVII w. Kościół zbudowany jest z drewna, dlatego wykonanie dokumentacji architektonicznej jest szczególnie ważne, ponieważ w momencie jego uszkodzenia lub całkowitego zniszczenia dane ze skaningu laserowego pozwolą na dokładną odbudowę czy rekonstrukcję.

Zewnętrzna elewacja budynku pomierzona została z czterech stanowisk (ST 1-4), wewnętrzna zaś na podstawie dwóch stanowisk (ST 5-6). Obie części połączone zostały na podstawie tarcz celowniczych HDS.

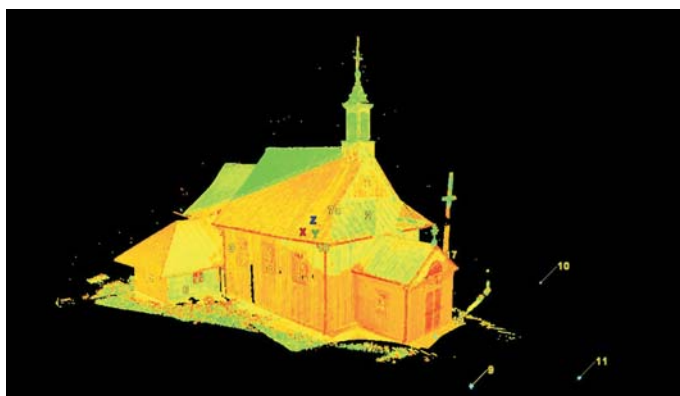
### **3.2. Skanowanie — część zewnętrzna**

Skanowanie przeprowadzone zostało z rozdzielczością 5 mm na zadanej odległości ok. 30 m, co pozwoliło na pozyskanie ok. 10 mln punktów przedstawiających elewację budynku. Skany wykonane na poszczególnych stanowiskach zapisywane są w tzw. środowiskach skanowania (ang. *Scan Worlds*). Stanowiska połączone zostały każde za pomocą co najmniej pięciu wspólnych tarcz (szkic, rys. 1).

Oprócz danych o geometrii obiektu, podczas pomiaru pozyskuje się również informację o intensywności powracającej do detektora wiązki laserowej (rys. 2). Barwa czerwona świadczy o słabym odbiciu, niebieska zaś o wysokim albedo. Na podstawie takich informacji istnieje również możliwość badania stanu materiału, z jakiego wykonany jest obiekt.



Rys. 1. Szkic rozmieszczenia stanowisk i tarcz celowniczych HDS



Rys. 2. Zewnętrzna część kościoła — połączone skany

### 3.3. Rejestracja — łączenie danych

Pierwszym wstępnym opracowaniem danych jest połączenie i zorientowanie względem siebie wszystkich skanów. Wzajemna orientacja skanów pozyskanych ze skaningu laserowego z różnych, niezależnych od siebie stanowisk zwana jest rejestracją. Rejestracja skanów może odbyć się poprzez manualne odnalezienie odpowiadających sobie szczegółów pomierzonych obiektów na pokrywających się obszarach skanów bądź w pełni automatycznie: przez wyszukiwanie punktów

homologicznych w postaci celi HDS, bądź na podstawie cech geometrycznych obiektów (powierzchni płaskich lub konturów obiektów). Przykładem takiego rozwiązania jest zaproponowany przez C. Brennera i C. Dolda algorytm orientacji wzajemnej skanów, który najpierw automatycznie wyróżnia powierzchnie płaskie w każdej osobnej chmurze punktów, a później przyporządkowuje sobie trójki takich elementów pomiędzy różnymi zestawami pomierzonych danych. Służy to następnie do wyznaczenia składowych orientacji wzajemnej: rotacji i przesunięcia względem siebie wszystkich chmur punktów tworzących skan danego obiektu. Matematycznie sprowadza się to do wyznaczenia sześciu stopni swobody: najpierw macierzy rotacji  $R$  (zależność między punktami z dwóch skanów):

$$x_1 = R \cdot x_2 + t$$

i później wektora przesunięcia między punktami ( $t$ ), wykorzystując definicję płaszczyzny (wyznaczoną przez wektory normalne  $n, m, p$ ), analizę wektorów własnych oraz transformację:

$$\begin{bmatrix} n^T \\ m^T \\ p^T \end{bmatrix} \cdot t = \begin{bmatrix} d_1 - d_2 \\ e_1 - e_2 \\ f_1 - f_2 \end{bmatrix}.$$

Takie podejście zapewnia równomierny rozkład błędu wyznaczenia wielkości kątowych orientacji pomiędzy dwoma odpowiadającymi sobie wektorami.

I tak, dla części zewnętrznej, rejestracja metodą „na tarcze”, gdzie punktami wiążącymi są właśnie tarcze HDS, przeprowadzona została z błędem RMS nieprzekraczającym wartości 3 mm. Dokładność rejestracji i błędy na poszczególnych tarczach przedstawione są w tabeli 1. Warto zauważyć, że błędy na poszczególnych sygnałach osiągają wartości na poziomie dokładności pomiaru skanera, co znacznie podwyższa dokładność dalszych opracowywanych produktów.

Wektory błędów przedstawiają kolejne składowe całkowitego błędu średniego, a także błędy poziome i pionowe. Eksperyment pozwolił stwierdzić, że aby uzyskać poprawne i wiarygodne wyniki łączenia skanów i oszacować jego dokładność, konieczne jest zastosowanie co najmniej 5 (minimalna liczba to 3, co wynika z liczby parametrów w równaniu łączenia skanów) równomiernie rozmieszczonych w przestrzeni punktów sygnalizowanych.

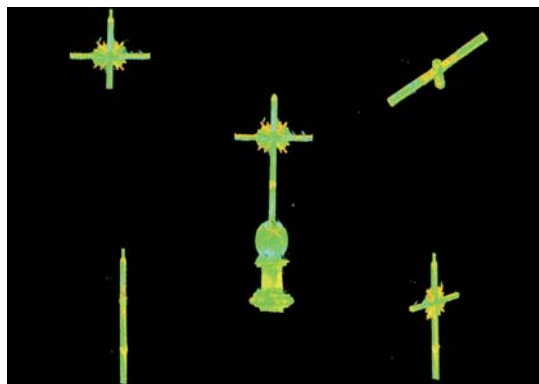
Oprócz analizy dokładności na podstawie wzajemnej orientacji skanów, przeprowadziliśmy także analizę na podstawie wpasowania pewnych elementów. W tym przypadku rozważyliśmy przypadek dopasowania krzyża pomierzonego z wszystkich czterech stanowisk. Jest to niewielki obiekt znajdujący się na szczycie wieży, najbardziej oddalony od każdego stanowiska skanera. Posiada on dodatkowo małe

TABELA 1

Wyniki rejestracji skanów (część zewnętrzna — 4 stanowiska)

Tarcza (T)	ScanWorld	ScanWorld	RMSE [m]	Wektor błędu [m]	Błąd poz. [m]	Błąd pion. [m]
T: 1	SW1	SW 2	0,002	( 0,000, -0,001, -0,001)	0,001	-0,001
T: 2	SW1	SW 2	0,001	(-0,001, 0,001, 0,000)	0,001	0,000
T: 3	SW 1	SW 2	0,003	( 0,001, -0,001, 0,002)	0,002	0,002
T: 4	SW 1	SW 2	0,002	(-0,002, -0,001, 0,000)	0,002	0,000
T: 5	SW 1	SW 2	0,003	(-0,001, 0,003, 0,001)	0,003	0,001
T: 1	SW 1	SW 3	0,002	( 0,001, -0,001, -0,001)	0,002	-0,001
T: 5	SW 1	SW 3	0,002	(-0,001, 0,001, 0,000)	0,002	0,000
T: 1	SW 1	SW 4	0,003	( 0,003, 0,000, -0,001)	0,003	-0,001
T: 5	SW 2	SW 3	0,001	( 0,000, -0,001, -0,001)	0,001	-0,001
T: 6	SW 2	SW 3	0,002	(-0,001, 0,002, -0,001)	0,002	-0,001
T: 1	SW 2	SW 3	0,001	( 0,001, 0,000, 0,001)	0,001	0,001
T: 9	SW 2	SW 3	0,002	( 0,000, -0,001, 0,001)	0,001	0,001
T:8a	SW 2	SW 3	0,002	(-0,002, -0,001, 0,000)	0,002	0,000
T: 1	SW 2	SW 4	0,003	( 0,003, 0,001, 0,000)	0,003	0,000
T:7a	SW 2	SW 4	0,002	( 0,000, 0,002, -0,001)	0,002	-0,001
T: 9	SW 2	SW 4	0,003	(-0,002, -0,001, 0,003)	0,002	0,003
T:8a	SW 2	SW 4	0,003	(-0,002, 0,000, -0,001)	0,002	-0,001
T:8a	SW 3	SW 4	0,001	( 0,000, 0,000, -0,001)	0,000	-0,001
T: 9	SW 3	SW 4	0,003	(-0,002, 0,001, 0,002)	0,002	0,002
T: 1	SW 3	SW 4	0,002	( 0,001, 0,001, -0,001)	0,002	-0,001
T:10	SW 3	SW 4	0,001	( 0,000, 0,001, 0,001)	0,001	0,001
T:11	SW 3	SW 4	0,003	(-0,003, -0,002, 0,000)	0,003	0,000
T:12	SW 3	SW 4	0,001	( 0,001, -0,001, -0,001)	0,001	-0,001
T:13	SW 3	SW 4	0,002	( 0,001, -0,001, 0,000)	0,001	0,000
T: 14	SW 3	SW 4	0,001	(-0,001, 0,000, 0,000)	0,001	0,000
T: 15	SW 3	SW 4	0,000	( 0,000, 0,000, 0,000)	0,000	0,000
T: 16	SW 3	SW 4	0,001	( 0,001, 0,000, 0,000)	0,001	0,000

elementy ozdobne, które posłużą do określenia (wizualnie) jakości wpasowania poszczególnych chmur punktów (rys. 3).



Rys. 3. Krzyż wpasowany z czterech stanowisk

### 3.4. Skanowanie wnętrza

Głównym celem skanowania wnętrza kościoła było zachowanie szczegółów takich jak ornamenty, rzeźby, sklepienie, niewralgiczne elementy konstrukcji itp. Na potrzeby prowadzenia dokładnej dokumentacji architektonicznej obiektu skanowanie wnętrza wykonane zostało z rozdzielczością 7 mm, a dla wybranych elementów gęstość punktów została zwiększona do 3 mm. Tak dokładne dane pochodzące z naziemnego skaningu laserowego posłużą do wykonania trójwymiarowych modeli i ortoobrazów ścian, sufitu, okien oraz rzeźb. Rysunek 4 przedstawia wybrane elementy architektury wnętrza kościoła w postaci chmur punktów.



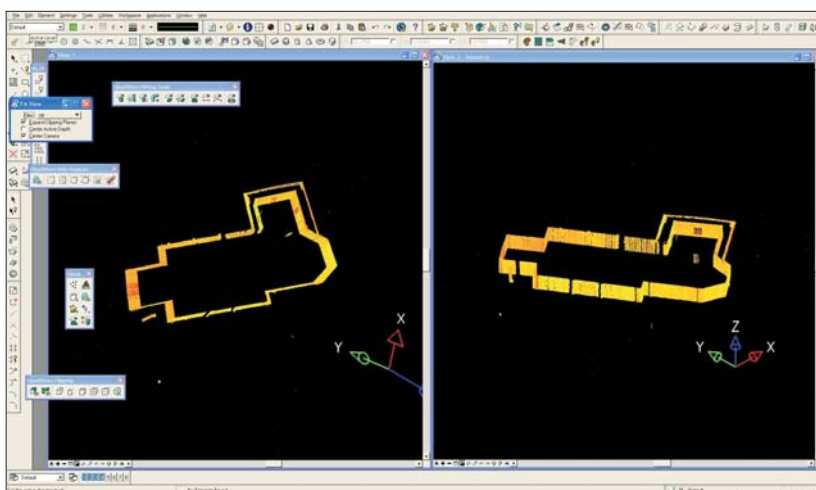
Rys. 4. Wynik skanowania wnętrza kościoła. Krąg na środku to pole pod stanowiskiem skanera

Wpasowanie obu części: zewnętrznej i wewnętrznej przeprowadzono również w oparciu o tarcze celownicze HDS. Wyrównanie osiągnęło błąd średni 0,002 m.

#### 4. Opracowanie danych — produkty końcowe

Najczęściej, dane pochodzące z NSL w postaci chmury punktów wykorzystywane są do wizualizacji obiektów (łącznie z teksturowaniem), generowania modeli 3D, ortoobrazów, rysunków wektorowych itp. Przykładem jednego z zastosowań jest rysowanie dokładnych przekroji budynków (rys. 5).

Przekroje służą do wykonania rzutów oraz dokładnych rysunków wektorowych.



Rys. 5. Przekrój obiektu

#### Modelowanie 3D

Bardzo często do generowania rysunków wektorowych wykorzystywane są trójwymiarowe modele obiektów, pozwalające na wierne odtworzenie konstrukcji czy wizualizację geometrii obiektu.

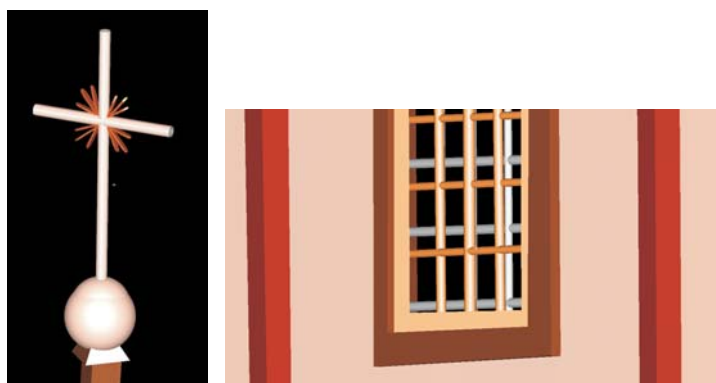
Po optymalizacji danych, obiekt przedstawiony został w postaci ok. 17 mln punktów. Do modelowania danych wykorzystano program Cyclon 5.8 oraz Microstation CloudWorx.

Rysunek 6 przedstawia model kościoła w Żukowie. Szczególne trudności przyniosło modelowanie specyficznych elementów o skomplikowanej budowie takich jak wieża kościoła, okna, elementy ozdobne itp.





Rys. 6. Trójwymiarowy model obiektu



Rys. 7. Zamodelowane fragmenty szczegółów

Najbardziej problematycznymi elementami obiektu są tzw. „cienie” i braki w danych. Związane jest to z polem widzenia skanera, a także ekspozycją obiektu, i widoczne najbardziej na szczycie obiektów (dachy lub górne części rzeźb) lub w miejscach, gdzie kształt i konstrukcja obiektu jest skomplikowana. W takich przypadkach musi zostać wybrana odpowiednia metoda modelowania. Istnieje kilka metod automatycznego modelowania danych, między innymi: modelowanie za pomocą brył geometrycznych lub za pomocą funkcji *meshing*, czyli tworzenia siatki trójkątów.

Problemem związanym z modelowaniem wykonanym pierwszą metodą jest jej ograniczenie jeżeli chodzi o modelowanie kształtów i powierzchni nieregularnych. Z kolei *meshing* pozwala na bardziej realistyczną wizualizację obiektów, jednak jest wrażliwy na wszelkie braki czy nieciągłości w danych, a ponadto wymaga dużo mocy obliczeniowej komputera.

Szczegółowym przykładem modelowania są modele okna i omawianego już wcześniej krzyża znajdującego się na wieży.

Zamodelowane fragmenty wymagały wpasowania chmury punktów w zdefiniowane w programie płaszczyzny czy figury geometryczne.

## 5. Podsumowanie

Zastosowanie techniki NSL w architekturze staje się coraz bardziej popularne, głównie ze względu na dokładność i bardzo krótki czas pozyskania danych. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów i badań można stwierdzić, że naziemny skaning laserowy jest odpowiednim narzędziem do celów architektonicznych i konserwatorskich. Dokładność pozyskania i rejestracji danych utrzymuje się na poziomie dokładności pomiaru (czyli 3-4 mm). NSL umożliwia pozyskanie bardzo dużej liczby punktów, a tym samym bardzo szczegółowej informacji o geometrii obiektu i jego detalach. Do produktów, które mogą znaleźć zastosowanie w architekturze, zalicza się trójwymiarowe modele oraz rysunki wektorowe. W artykule przedstawione zostały wybrane aspekty dokumentacji architektonicznej obiektów zabytkowych oraz problemy pojawiające się podczas jej tworzenia. Zaproponowane rozwiązania, takie jak odpowiedni dobór liczby i lokalizacja stanowisk oraz parametrów skanowania w zależności od warunków zewnętrznych, powinny być brane pod uwagę w pracach bazujących na danych pozyskanych impulsowym skanerem laserowym.

Artykuł wpłynął do redakcji 1.07.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w lipcu 2009 r.

### LITERATURA

- [1] T. ABMAYR, F. HÄRTL, M. REINKÖSTER, C. FRÖHLICH, *Terrestrial laser scanning — applications in cultural heritage conservation and civil engineering*, Proceedings of the ISPRS Working Group V/4 Workshop 3D-ARCH 2005: Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, Mestre-Venice, Italy, 22-24 August, 2005.
- [2] C. BRENNER, C. DOLD, *Automatic relative orientation of terrestrial laser scans using planar structures and angle constraints*, ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser, Espoo, Finlandia, 2007.
- [3] H. KARABORK, F. YILDIZ, M. YAKAR, ALTUNTAS, L. KARASAKA, *Modeling and visualization using laser scanner in documentation of cultural heritage*, XXI international CIPA symposium, Ateny, 2007.
- [4] H. MAYER, M. MOSCH, J. PEIPE, *3D model generation and visualization of Wartburg Castle*, ISPRS Int. Workshop on Processing and Visualization Using High-Resolution Imagery”, 36, PART 5/W1, Pitsanulok, Tailandia, 18-20 November, 2004.
- [5] M. KĘDZIERSKI, P. WALCZYKOWSKI, A. FRYŠKOWSKA, *Wybrane aspekty opracowania dokumentacji architektonicznej obiektów zabytkowych*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Międzysdroje, 2008.

M. KĘDZIERSKI, P. WALCZYKOWSKI, A. FRYŚKOWSKA

### Aspects of terrestrial laser scanning data acquisition and post-processing

**Abstract.** Terrestrial laser scanning is very useful tool for architectonic structures inventory. Thanks to its high precision and speed of data acquisition, we can collect information about geometry and dimensions in a short period of time. Recently, more and more attention is being paid to create architectonic documentation of cultural heritage structures — especially sacral structures. Data acquired from terrestrial laser scanner can be used in architecture. For example, façade models and vectorial sketches based on the 3D models are used very commonly by conservators for reconstruction or renovation purposes. In most cases, they are used as documentation indispensable to reconstruct the real structure condition from before renovation, create 2D sketches, and to reconstruct geometry of particular elements as sculptures, ceiling etc.

Data was acquired by terrestrial, pulsed laser scanner Leica ScanStation2. The examined structure is a wooden, historic church in Żuków. To scan all building parts (both interior and exterior) we used six stations. We obtained the scans resolution adequately: for exterior 5 mm, and interior 7 mm (for some details 3 mm).

The basic problem of measurements of such structures is adequate location of stations and tie points in the way that will enable further merging of both parts of the structure. Very often, external conditions make measurements difficult and force using particular methods of scanning and data fitting, what result in accuracy of the final products. In our tests, the RMSE of scan registration was equal to 2 mm. Errors on particular points (targets) have not exceeded the value of 3 mm (the same have not exceeded the accuracy of TLS measurements).

The final products of TLS data post-processing are: 3D models of spatial structures, orthoimages, but also vectorial sketches, especially important and useful for architectonic or conservatory purposes. In the paper we described also some basic methods and 3D modelling problems on some chosen examples. Modelling of irregular structures, such as monuments and sculptures, causes quite serious problems. The most common trouble are „shadows” connected with the field of view of the scanner (data inconsistencies, which are visible on the top of high monuments or in places where some elements obscure other details). In such cases, adequate modelling method should be used. For modelling of complex 3D shapes we used some standard methods of solid modelling. We compared modelling using basic solids and meshing function. Our experiments have been conducted with the use of *Cyclon* and CAD software.

In the paper we will present the most important aspects of acquisition and post-processing of the data acquired with the use of terrestrial laser scanner.

**Keywords:** terrestrial laser scanning, photogrammetry, 3D modeling, cultural heritage, architectonic documentation

**Universal Decimal Classification:** 528.7

