

**WYKORZYSTANIE NAZIEMNEGO SKANOWANIA LASEROWEGO
W OPRACOWANIU DOKUMENTACJI ARCHITEKTONICZNO-
BUDOWLANEJ ORAZ BADANIU ZNIEKSZTAŁCENIA DACHU**

**DEVELOPMENT OF ARCHITECTURAL AND CONSTRUCTION
DOCUMENTATION AND THE STUDY OF ROOF DISTORTION BASED
ON TERRESTRIAL LASER SCANNING DATA**

Damian Brinken, Tomasz Kogut

Katedra Geoinformatyki, Politechnika Koszalińska

SŁOWA KLUCZOWE: naziemne skanowanie laserowe, obiekt zabytkowy, chmura punktów

STRESZCZENIE: W artykule przedstawiono proces tworzenia dokumentacji architektoniczno-budowlanej wraz z analizą ugięcia więźby dachowej zabytkowego kościoła w Magnuszewicach w oparciu o opracowane dane z naziemnego skanowania laserowego. Przedstawiono przebieg kampanii pomiarowej z wykorzystaniem skanera Faro Focus3D X130. Opracowano otrzymane chmury punktów w programie Faro Scene. Wykonano ortoobrazy z chmur punktów w formie rastrów intensywności oraz na ich podstawie sporządzono w programie AutoCAD 2018 dokumentację architektoniczno-budowlaną. W skład dokumentacji wchodziły cztery rysunki elewacji, przekrój podłużny i poprzeczny oraz rzut nawy kościoła. Ostatnim etapem tworzenia dokumentacji było zbadanie deformacji konstrukcji dachowej na podstawie sporządzonych przekrojów poprzecznych. Wyniki badania deformacji wykazywały znaczne rozbieżności na niektórych elementach konstrukcyjnych. Średnie odchylenie było wielkości kilku centymetrów, natomiast największe wyniosło 0.31 m.

1. WSTĘP

Zabytki w naszej kulturze odgrywają ważną rolę i aby zachować je dla naszych przyszłych pokoleń konieczna jest ich ochrona. Inwentaryzacja obiektów zabytkowych umożliwia sporządzenie dokumentacji architektoniczno-budowlanej, która jest podstawą dla prac konserwatorskich, renowacyjnych, architektonicznych czy budowlanych (Kędziński *et al.*, 2008). Technologia naziemnego skanowania ze względu na szybkość i dokładność w ostatnich latach znalazła szereg zastosowań m.in. archeologia, badanie deformacji, monitoring środowiska naturalnego czy inwentaryzacja obiektów budowlanych (Abmayr *et al.*, 2005). Umożliwia ona rejestrację rzeczywistego stanu obiektów (Bernat *et al.*, 2016). Wynikiem skanowania jest chmura punktów o znanych współrzędnych przestrzennych (Bazarnik, 2014), (Bernat *et al.*, 2016). W literaturze (Hejmanowska *et al.*, 2015), (Kwoczynska *et al.*, 2016) można znaleźć liczne opracowania z użyciem naziemnego skanowania laserowego. Głównymi produktami ze skanowania są (Bernat *et al.*, 2016): chmura punktów, rzuty i przekroje pionowe, modele przestrzenne oraz ortoobrazy.

2. NAZIEMNY SKANING LASEROWY

Technologia skanowania laserowego jest dynamicznie rozwijającą się metodą pozyskiwania danych o obiektach. Skaner laserowy zalicza się do aktywnych systemów pomiarowych, którego działanie oparte jest na pomiarze odległości pomiędzy celem a urządzeniem wraz z pomiarem kierunku wysłania promienia laserowego. Częścią skanera jest układ optyczny emitujący falę elektromagnetyczną z określną częstotliwością. Odbicie od przeszkody jest rejestrowane jako położenie punktu w przestrzeni. Wszystkie punkty mają przypisane współrzędne przestrzenne X, Y, Z w lokalnym układzie skanera. Współrzędne przelicza się na podstawie zależności:

$$X=d \cos\beta \cos\alpha$$

$$Y=d \cos\beta \sin\alpha$$

$$Z=d \sin\beta$$

gdzie:

α - kąt poziomy,

β - kąt pionowy,

d - odległość skośna.

Finalnym produktem skanowania jest „chmura punktów” (Bazarnik, 2014), (Bernat *et al.*, 2016). Ze względu na sposób pomiaru odległości skanery laserowe można podzielić na impulsowe, fazowe oraz triangulacyjne (Kaspar *et al.*, 2004). Przy różnego rodzaju obiektach pomiar może być wykonywany przy użyciu skanera fazowego (większa szybkość skanowania, ale mniejszy zasięg) lub impulsowego (mniejsza szybkość skanowania, ale większy zasięg) (Kraszewski, 2012). Oprócz współrzędnych przestrzennych dla każdego punktu zapisywana jest wartość intensywności, która definiuje natężenie promieniowania odbitego w odniesieniu do promieniowania emitowanego przez laser. Intensywność punktów przedstawiana jest w odcieniach skali szarości (Pfeifer *et al.*, 2007), (Soudarissanane, 2008).

3. OBIEKT BADAŃ

Do opracowania dokumentacji architektoniczno-budowlanej wybrano zabytkowy kościół pod wezwaniem świętej Barbary w Magnuszewicach (Rys.1). Magnuszewice jest to wieś położona w województwie wielkopolskim, w powiecie jarocińskim, w gminie Kotlin. Budowla powstała w latach 1751-1752. Badany obiekt jest zbudowany na planie prostokąta z węższym zamkniętym trójbocznie prezbiterium. Od północnej strony przylega do niej zakrystia, a od południowej strony do nawy głównej przylega kwadratowa kruchta, która została dobudowana w roku 1884. Kościół jest przykryty dachem dwuspadowym, nad prezbiterium wielopołaciowym, który pokryty jest gontem. Nad pokryciem dachowym znajduje się smukła wieżyczka sygnaturki, nakryta dachem namiotowym. Kościół jest budowlą drewnianą o konstrukcji zrębowej. Wewnątrz kościoła znajdują się trzy nawy,

nakryte pozornym sklepieniem kolebkowym z gurtami. Są one wydzielone profilowanym gzymsem wspartym dwoma rzędami słupów połączonych arkadami (Maluśkiewicz, 2004).



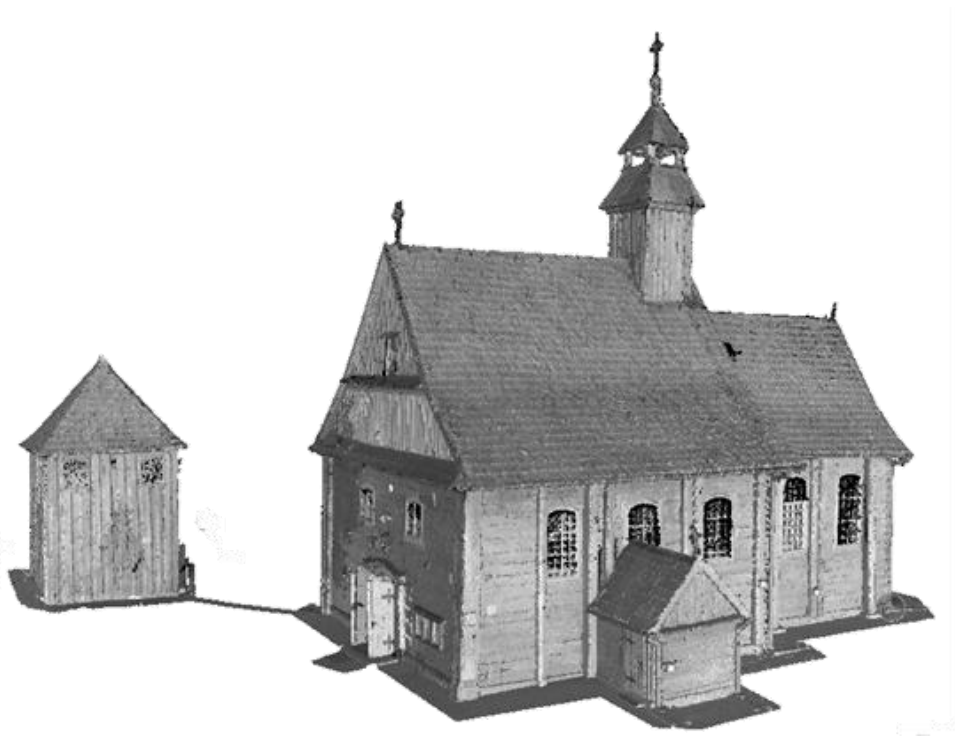
Rys. 1. Kościół w Magnuszewicach

Źródło: Magnuszewice, www.zabytek.pl (data dostępu: 17.05.2018)

4. POZYSKANIE I OPRACOWANIE DANYCH ŹRÓDŁOWYCH

Skanowanie obiektu wykonano fazowym skanerem laserowym Faro Focus3D, którego błąd pomiaru odległości wynosi ± 2 mm (Faro, 2014) oraz zostało podzielone na trzy etapy. Etap pierwszy obejmował pomierzenie zewnętrznej części kościoła z 14 stanowisk. Etapem drugim objęto nawę kościoła z 19 stanowisk. Skanowanie zakończono pomiarem strychu kościoła z 20 stanowisk. Rozdzielczość skanów na zewnątrz kościoła to 44 miliony punktów, natomiast wewnątrz 11 milionów punktów.

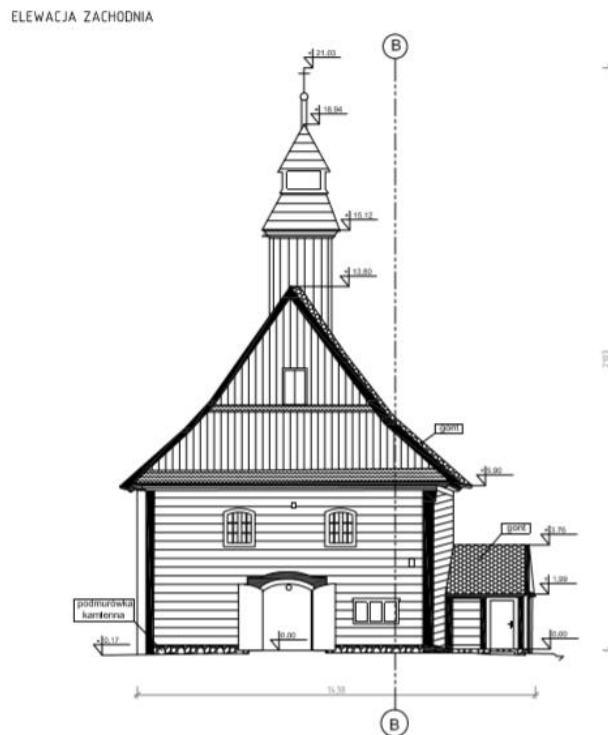
Dane opracowano wykorzystując oprogramowanie Faro Scene oraz Autodesk ReCap Pro. Orientacja skanów została przeprowadzona automatycznie z wykorzystaniem kul referencyjnych o średnicy 20 cm. Średni błąd odległości celu dla chmur punktów na zewnątrz kościoła wyniósł 6 mm, dla nawy kościoła 5 mm, a dla strychu 5 mm. Połączenie klastra strychu oraz nawy wykazało średni błąd na poziomie 5 mm. Etap wstępnego przetwarzania skanów zakończono łącząc klastr zewnętrzny z wewnętrznym uzyskując średni błąd odległości celu 8 mm. Maksymalny błąd wyniósł 20 mm, a minimalny 2 mm. Następnie chmurę punktów poddano manualnej filtracji. Wyeliminowano dane przypadkowe, niepożądane oraz obserwacje odstające. Finalną chmurę punktów przedstawia rysunek 2.



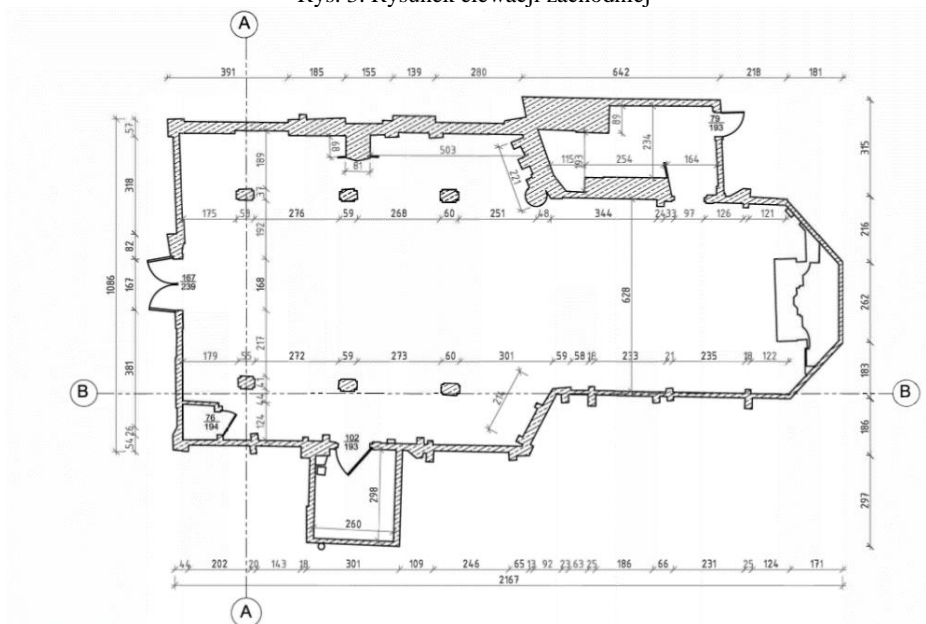
Rys. 2. Chmura punktów kościoła w Magnuszewicach

5. OPRACOWANIE DOKUMENTACJI ARCHITEKTONICZNO-BUDOWLANEJ

Dokumentację architektoniczno-budowlaną opracowano na podstawie ortoobrazów wygenerowanych w Faro Scene wykorzystując narzędzie ClippingBox. Wykonano ortoobrazy elewacji z czterech stron, przekroju poprzecznego i podłużnego oraz rzutu parteru. Ortoobrazy obrysowano w programie AutoCAD 2018 wykorzystując specjalistyczne narzędzia. Inwentaryzacja została przeprowadzona z natury i obrazuje rzeczywiste wymiary elementów inwentaryzowanego obiektu. Rysunki zwymiarowano i wykonano w skali 1:100. Rysunek elewacji zachodniej przedstawiono na rysunku 3, rzutu parteru na rysunku 4.



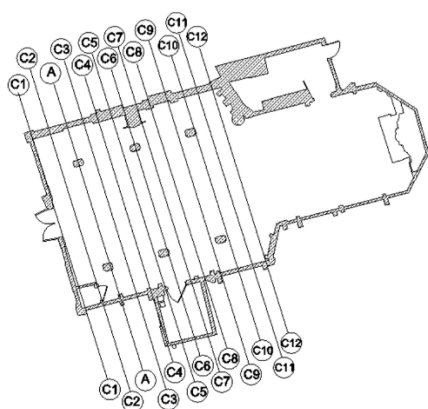
Rys. 3. Rysunek elewacji zachodniej



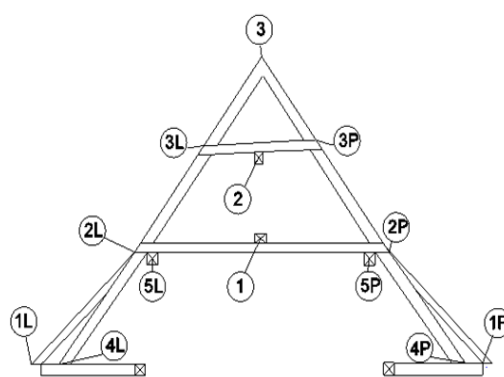
Rys. 4. Rysunek rzutu parteru

6. BADANIE DEFORMACJI KONSTRUKCJI DACHOWEJ

Opracowanie dokumentacji przy użyciu skanera laserowego obejmowało również zbadanie deformacji konstrukcji dachowej kościoła w Magnuszewicach. Do analizy wybrano konstrukcję dachową nad główną nawą kościoła, która zbudowana jest z wielu elementów, mogących ulec deformacji z powodu czynników zewnętrznych, ciężaru lub wieku obiektu. Wykrycie deformacji polegało na sporządzeniu trzynastu przekrojów poprzecznych. Przekroje poprowadzono tak, by przechodziły przez wszystkie krokwie więźby dachowej i ilustrowały wszystkie elementy konstrukcyjne. Przebieg przekrojów ilustruje rysunek 5, a opis punktów poddanych analizie zawarty jest w tabeli 1.



Rys. 5. Przebieg przekrojów



Rys. 6. Rozmieszczenie punktów badawczych

Tabela 1. Punkty badawcze

Znak	Punkt badawczy
1L	belka kulawkowa-przepustnica (lewa)
2L	jętka większa-krokiew (lewa)
3L	jętka mniejsza-krokiew (lewa)
4L	belka kulawkowa-krokiew(lewa)
5L	środek płatwi (lewa)
1	środek podwaliny
2	środek oczepu
3	łączenie krokwi na szczycie
1P	belka kulawkowa-przepustnica (prawa)
2P	jętka większa-krokiew (prawa)
3P	jętka mniejsza-krokiew (prawa)
4P	belka kulawkowa-krokiew (prawa)
5P	środek płatwi (prawa)

Przekroje sporządzono w formie rastrów intensywności w oprogramowaniu Faro Scene. Następnie w programie AutoCAD 2018 obrysowano wszystkie elementy konstrukcyjne. Do zbadania przemieszczeń elementów przekrój A-A wybrano jako referencyjny. Następnie określono miejsca, w których według autorów deformacje mogłyby przyjmować największe wartości (Rys. 6).

Odchylenia pomiędzy elementami kolejnych przekrojów, a elementami przekroju A-A pomierzono w programie AutoCAD 2018 i przedstawiono w formie tabelarycznej (tabela 2-5).

Tabela 2. Tabela wartości deformacji na przekrojach C1-C1, C2-C2, C3-C3

C1-C1			C2-C2			C3-C3		
	X[m]	Y[m]		X[m]	Y[m]		X[m]	Y[m]
1L	-0.01	0.00	1L	0.00	-0.02	1L	-0.05	-0.03
2L	0.28	0.24	2L	0.02	-0.05	2L	-0.02	-0.04
3L	0.00	-0.11	3L	-0.05	-0.14	3L	0.13	0.07
4L	0.04	0.00	4L	0.10	0.00	4L	-0.03	-0.02
5L	0.17	0.25	5L	-0.01	-0.01	5L	0.05	0.00
1	0.18	0.04	1	-0.04	-0.02	1	0.09	-0.05
2	0.04	-0.12	2	-0.02	-0.15	2	0.17	-0.04
3	0.04	0.03	3	-0.02	0.01	3	0.02	-0.03
1P	-0.01	-0.08	1P	0.00	-0.07	1P	-0.03	-0.07
2P	-0.20	0.18	2P	0.01	-0.03	2P	-0.04	-0.02
3P	0.12	-0.22	3P	0.19	-0.31	3P	0.06	-0.19
4P	0.12	-0.07	4P	0.12	-0.06	4P	0.02	-0.06
5P	-0.08	0.18	5P	0.02	0.03	5P	0.08	-0.01

Największa odchyłka na przekroju C1-C1 (tabela 2) wystąpiła na łączeniu jętki większej z lewą krokwią (2L) i wynosiła 0.28 m na osi X oraz 0.24 m na osi Y. Na przekroju C2-C2 największą odchyłkę zaobserwowano na łączeniu jętki małej z prawą krokwią (3P) i wynosiła 0.19 m na osi X oraz -0.31 m na osi Y. Na przekroju C3-C3 również można zaobserwować największą odchyłkę w tym samym miejscu (3P), wynosiła ona 0.06 m na osi X oraz -0.19 m na osi Y.

Na przekroju C4-C4 (tabela 3) największą zmianę zaobserwowano w miejscu 3L, która wynosiła 0.08 m na osi X i 0.14 m na osi Y. Na przekroju C5-C5 największą deformację miała lewa płatek (5L) i wynosiła 0.04 m na osi X oraz 0.12 m na osi Y. Na przekroju C6-C6 nie zaobserwowano dużych zniekształceń, największe wystąpiło na lewej pławie (5L) i wynosiło 0.08 m na osi X oraz 0.07 m na osi Y.

Na przekroju C7-C7 (tabela 4) największą odchyłkę zaobserwowano na łączeniu jętki mniejszej z prawą krokwią (3P) i miała ona wielkość 0.07 m na osi X oraz -0.15 m na osi Y. Przekrój C8-C8 największe zniekształcenie reprezentował w punkcie 3P i wynosiło ono -

0.03 m na osi X oraz na osi Y -0.09 m. Na przekroju C9-C9 największa odchyłka wystąpiła na lewej płacie (5L), wynosiła ona 0.09 m na osi X oraz 0.13 m na osi Y.

Tabela 3. Tabela wartości deformacji na przekrojach C4-C4, C5-C5, C6-C6

C4-C4			C5-C5			C6-C6		
	X[m]	Y[m]		X[m]	Y[m]		X[m]	Y[m]
1L	-0.06	0.02	1L	0.03	0.01	1L	0.06	-0.02
2L	0.00	0.01	2L	0.03	0.08	2L	-0.03	0.08
3L	0.08	0.14	3L	-0.01	0.00	3L	0.02	0.01
4L	-0.04	0.02	4L	-0.01	0.02	4L	0.04	-0.01
5L	0.05	0.05	5L	0.04	0.12	5L	0.08	0.07
1	-0.01	0.00	1	0.06	0.00	1	0.09	-0.02
2	0.13	0.05	2	0.03	0.01	2	0.06	0.02
3	0.00	0.02	3	0.01	0.02	3	0.02	-0.02
1P	-0.04	-0.03	1P	0.04	-0.05	1P	0.03	-0.03
2P	-0.03	0.09	2P	-0.01	-0.03	2P	-0.03	-0.01
3P	-0.05	0.06	3P	0.03	-0.06	3P	-0.01	-0.04
4P	0.02	-0.02	4P	-0.05	0.00	4P	0.04	-0.03
5P	0.01	0.12	5P	-0.01	0.04	5P	0.02	0.01

Tabela 4. Tabela wartości deformacji na przekrojach C7-C7, C8-C8, C9-C9

C7-C7			C8-C8			C9-C9		
	X[m]	Y[m]		X[m]	Y[m]		X[m]	Y[m]
1L	0.04	-0.03	1L	-0.02	-0.04	1L	0.03	0.01
2L	0.10	0.07	2L	-0.05	0.04	2L	0.04	0.12
3L	0.09	0.06	3L	0.00	0.03	3L	0.05	0.08
4L	-0.01	-0.04	4L	-0.01	-0.03	4L	-0.02	0.03
5L	0.05	-0.05	5L	0.05	0.06	5L	0.09	0.13
1	-0.01	-0.06	1	0.04	-0.06	1	0.12	0.02
2	0.11	0.00	2	0.02	0.01	2	0.08	0.05
3	0.00	-0.04	3	-0.02	-0.03	3	0.03	0.02
1P	0.00	-0.08	1P	-0.01	-0.06	1P	0.12	-0.01
2P	0.04	0.06	2P	-0.01	0.07	2P	0.07	-0.04
3P	0.07	-0.15	3P	-0.03	-0.09	3P	0.02	0.00
4P	-0.02	-0.06	4P	-0.01	-0.07	4P	0.06	0.00
5P	-0.01	0.09	5P	-0.02	-0.03	5P	0.04	0.01

Tabela 5. Tabela wartości deformacji na przekrojach C10-C10, C11-C11, C12-C12

C10-C10			C11-C11			C12-C12		
	X[m]	Y[m]		X[m]	Y[m]		X[m]	Y[m]
1L	-0.04	-0.06	1L	-0.08	0.00	1L	-0.01	0.00
2L	0.00	0.05	2L	0.02	-0.04	2L	-0.03	0.08
3L	-0.01	-0.04	3L	0.11	0.09	3L	-0.02	-0.02
4L	0.01	-0.04	4L	-0.01	0.02	4L	0.00	0.02
5L	0.05	0.08	5L	0.01	-0.01	5L	-0.02	0.09
1	0.08	-0.06	1	-0.02	-0.02	1	0.04	-0.01
2	0.01	-0.03	2	0.11	0.02	2	0.05	0.01
3	0.02	-0.03	3	-	-	3	-	-
1P	0.10	-0.10	1P	-0.03	-0.01	1P	0.10	-0.04
2P	-0.01	-0.07	2P	-0.02	0.08	2P	0.00	-0.02
3P	-0.02	-0.10	3P	0.08	-0.13	3P	-0.05	-0.14
4P	0.09	-0.06	4P	-0.01	-0.03	4P	0.07	-0.02
5P	-0.01	-0.04	5P	0.04	0.11	5P	0.02	-0.01

Na przekroju C10-C10 (tabela 5) największa odchyłka wystąpiła na łączeniu prawej belki kulawkowej z przepustnicą (1P) i miała ona wielkość 0.1 m na osi X oraz -0.1 m na osi Y. Na przekroju C11-C11 największa zmiana miała miejsce w punkcie 3P i wynosiła ona 0.08 m na osi X oraz -0.13 m na osi Y. Przekrój C12-C12 przedstawiał największą odchyłkę w punkcie 3P, która wynosiła -0.05 m na osi X oraz 0.14 m na osi Y.

Wyniki badania deformacji wykazywały znaczne rozbieżności na niektórych elementach konstrukcyjnych. Średnie odchylenie było wielkości kilku centymetrów, natomiast największe wyniosło 0.31 m. Świadczy to o znaczących odchyleniach, które mogą wynikać z wieku budynku, ciężaru własnego, nieprawidłowego montażu konstrukcji lub czynników zewnętrznych.

7. BADANIE DEFORMACJI KONSTRUKCJI DACHOWEJ

Technologia naziemnego skanowania laserowego (TLS) stanowi cenne źródło pozyskiwania danych o obiektach. TLS umożliwia szybkie pozyskanie dokładnych danych potrzebnych do odwzorowania obiektów również tych, które są złożone i skomplikowane pod względem kształtu. W odróżnieniu od klasycznych metod pomiaru w celu pozyskania odpowiedniej ilości danych o obiekcie posiadającym złożony kształt nie wymaga dużego nakładu pracy, czasu oraz osób. Nakreśla ona rzeczywiste możliwości zastosowania pozyskanych danych do opracowania dokumentacji obiektów, a w szczególności do:

- pomiarów geometrii obiektów,
- sporządzenia dokumentacji architektoniczno-budowlanej,
- badania deformacji obiektów,

- sporządzania ortoobrazów,
 - sporządzania zbiorów danych dla konserwatora zabytków o bieżącym stanie obiektu.
- Sporządzona dokumentacja architektoniczno-budowlana oraz wyniki badania deformacji są cennym źródłem danych do monitoringu zmian i przebiegu dalszych deformacji. Zwłaszcza w budynkach zabytkowych, które nie mają żadnej dokumentacji archiwalnej.

LITERATURA

Abmayr T., Hartl F., Reinkoster M., Frohlich C., 2005. Terrestrial Laser Scanning – Applications in Cultural Heritage Conservation and Civil Engineering. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, 36.

Bernat M., Byzdra A., Chmielecki M., Laskowski P., Orzechowski J., Rzepa S., Szulwic J., Ziółkowski P., 2016. Zastosowanie naziemnego skaningu laserowego i przetwarzanie danych: inwentaryzacja i inspekcja obiektów budowlanych, Wydawnictwo Polskiego Internetowego Informatora Geodezyjnego I-NET. PL & Katedra Geodezji WILiS Politechnika Gdańska.

Bazarnik M., 2014. Terrestrial Laser Scanning 3D as a useful method for monitoring of urban areas endangered by landslides. *Geology, Geophysics & Environment*, 41(4), 63-64.

FARO, 2014 Laser Scanner Focus3D X 130 Tech Sheet, 2014.

Hejmanowska B., Kaminski W., Przyborski M., Pyka K., Pырchła J., 2015. Modern remote sensing and the challenges facing education systems in terms of its teaching. *EDULEARN15 Proceedings, 7th International Conference on Education and New Learning Technologies*, Barcelona, Spain, pp. 6549-6558.

Kaspar M., Pospisil J., Stroner M., Kremen T., Tejkal M., 2004. Laser Scanning in civil engineering and land surveying, Vega s.r.o., Republika Czeska.

Kędzierski M., Walczykowski P., Fryškowska J., 2008. Wybrane aspekty opracowania dokumentacji architektonicznej obiektów zabytkowych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 18a, 221–230.

Kraszewski B., 2012. Wykorzystanie naziemnego skaningu laserowego do inwentaryzacji pomieszczeń biurowych, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 23, 187–196.

Kwoczynska B., Litwin U., Piech I., Obirek P., Sledz J., 2016. The Use of Terrestrial Laser Scanning in Surveying Historic Buildings, *Proceedings of 2016 Baltic Geodetic Congress*, 263-268.

Małuśkiewicz P., 2004. Drewniane kościoły w Wielkopolsce, Wojewódzka Biblioteka Publiczna i Centrum Animacji Kultury, Poznań.

Pfeifer N., Dorninger P., Haring A., Fan H., 2007. Investigating Terrestrial Laser Scanning Intensity Data: Quality and Functional Relations. Vienna, Austria: Vienna University of Technology, *Proceedings of VIII International Conference on Optical 3-D Measurement Techniques*, Zürich, Switzerland, pp. 328-337.

Soudarissanane S., Lindenbergh R., Gorte B., 2008. Reducing the error in terrestrial laser scanning by optimizing the measurement set-up, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, 615-620.

DEVELOPMENT OF ARCHITECTURAL AND CONSTRUCTION DOCUMENTATION AND THE STUDY OF ROOF DISTORTION BASED ON TERRESTRIAL LASER SCANNING DATA

KEY WORDS: terrestrial laser scanning, monument, point cloud

Summary

The article presents the process of creating architectural and construction documentation along with the analysis of the deformation of the roof truss of a historic church in Magnuszewice based on the terrestrial laser scanning data. The course of the measurement campaign using the Faro Focus3D X130 scanner was presented. The received point clouds were registered in the Faro Scene. The architectural and construction documentation prepared in AutoCAD 2018 were based on orthophotos created from point cloud. The documentation included four elevation drawings, a cross-sections and projection of the church nave. The aim of last stage was the investigation of roof structure deformation based on the prepared cross-sections. The results of the deformation test showed significant discrepancies on some structural elements. The average deviation was a few centimeters, while the largest was 31 cm.

Dane autorów / Authors details

mgr inż. Damian Brinken
e-mail: damianbrinken@gmail.com

dr inż Tomasz Kogut
e-mail: tomasz.kogut@tu.koszalin.pl
telefon: +48 943 48 67 20

Przesłano / Submitted 18.12.2018
Zaakceptowano / Accepted 29.12.2018