

dr inż. Joanna A. Pawłowicz^{1*)}
 ORCID: 0000-0002-1334-5361
 dr hab. inż. Janusz R. Krentowski²⁾
 ORCID: 0000-0002-8009-8110
 prof. dr inż. Givi Gavardashvili³⁾
 ORCID: 0000-0001-5289-3830

Skaning laserowy 3D XVII-wiecznego alkierza

3D laser scanning of the 17th century alcove

DOI: 10.15199/33.2022.08.11

Streszczenie. W artykule przedstawiono badania skanerem laserowym 3D zabytkowej komnaty sypialnej. Pomiar miał służyć określeniu ogólnego stanu technicznego pomieszczenia, odtworzeniu jego geometrii, a przede wszystkim identyfikacji zakresu występowania polichromii malowanych na powierzchni tynku lub muru bez ingerencji w strukturę obiektu. Zastosowanie skanera laserowego pozwoliło na uzyskanie wyników, które posłużą do dalszych szczegółowych i specjalistycznych badań pomieszczenia.

Słowa kluczowe: chmura punktów; intensywność odbicia; inwentaryzacja budynku; stan techniczny obiektu.

Abstract. The article presents research with a 3D laser scanner of a historic sleeping chamber. The measurement was to be used to determine the general technical condition of the room, recreate its geometry, and above all to identify the extent of the polychrome painted on the surface of plaster or wall without interfering with the structure of the building. The use of a laser scanner allowed to obtain results that will be used for further detailed and specialized research of the room.

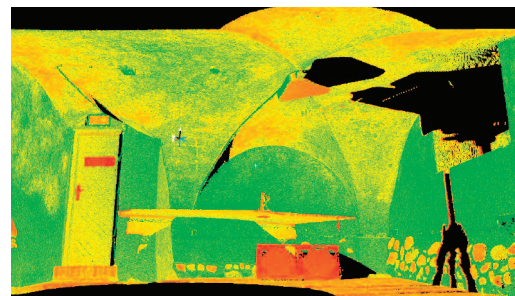
Keywords: point cloud; reflection intensity; building inventory; building facility technical condition.

Technologia naziemnego skaningu laserowego pozwala na pozyskiwanie przestrzennych danych rzeczywistych obiektów w postaci trójwymiarowej chmury punktów służącej do opracowania i wykonania wirtualnego modelu zeskanowanego budynku. Skanery laserowe, przez pomiar współrzędnych biegunowych każdego z punktów, umożliwiają ich opisanie w trójwymiarowej przestrzeni przez co najmniej trzy współrzędne (X, Y, Z) odniesione do lokalnego układu skanera. Rejestrowana jest również intensywność (I) odbicia wiązki lasera, którą oznacza się jako czwartą współrzędną. Jest to siła odbicia promienia laserowego wysyłanego przez skaner od powierzchni badanego przedmiotu. Intensywność odbicia jest rejestrowana na podstawie promienia świetlnego powracającego i zarejestrowanego przez urządzenie. Parametr ten stanowi źródło danych, których nie można zidentyfikować podczas badań wizualnych. Każdy materiał nałożony na skanowaną powierzchnię w różny sposób odbija światło, np. materiał wilgotny i suchy będzie inaczej odbijał promienie [1].

Istnieje wiele sposobów inwentaryzacji, umożliwiających zgromadzenie precyzyjnych danych geometrycznych opisujących obiekt. W tradycyjnej metodzie elementy konstrukcyjne modelowane są ręcznie, a cała dokumentacja opracowywana na podstawie fotografii i pomiarów manualnych. Taki sposób inwentaryzacji wymaga dużych nakładów pracy i czasu, a mimo to pozostawia wiele wątpliwości, jeśli chodzi o dokładność wykonanego modelu. Metoda skaningu laserowego znajduje zastosowanie w przypadku eksploatowanych obiektów, gdy niezbędne jest wykonanie inwentaryzacji architektonicznej czy konstrukcyjnej [1]. Wizualizacja obiektu utworzona z chmury punktów może posłużyć do określenia rzeczywistych parametrów i aktualnego stanu badanego budynku, przeprowadzenia analizy w kierunku jego remontu lub wprowadzenia pozyskanych danych do modeli w technologii BIM. Pomiar skanerem może zastąpić wykonanie inwentaryzacji architektoniczno-budowlanej metodami klasycznymi. Skaning laserowy pozwala na dokładne odwzorowanie geometrii obiektów zabytkowych o zróżnicowanej bryle i bogatym detalu architektonicznym [2]. Dodatkowo skaner wykonuje zdjęcia cyfrowe, które można nanieść na zeskanowaną chmurę punktów i uzyskać obraz w rzeczywistych kolorach.

Technologia skaningu laserowego jest najbardziej kompleksową metodą pomiaru, która w sposób automatyczny pobiera dane o geometrii i kształcie interesującego nas obiektu [3]. Wielomilionowa chmura punktów pokrywająca skanowane powierzchnie umożliwia stworzenie przestrzennego obrazu obiektu (fotografia 1) wraz z jego spekaniami i innymi wadami. Obraz cyfrowy pozwala również, w późniejszym etapie obróbki, na wykonanie pełnej dokumentacji budowlanej [4], składającej się z:

- dokumentacji 2D, np. rzuty i przekroje powstałe w efekcie przecinania i rzutowania danego obiektu na odpowiednio wybrane płaszczyzny czy widok ścian lub całych elewacji;
- dokumentacji 3D, np. modele powierzchniowe i szkieletowe oraz modele z nałożonymi teksturami tworzone z oczyszczonych chmur punktów przez ich modelowanie siatką TIN złożoną



Fot. 1. Cień rzucony na ścianę przez statyw drugiego skanera (strona prawa)
 Photo 1. Shadow cast on the wall by the second scanner's stand (right side)

¹⁾ Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie; Wydział Góeoingenierii

²⁾ Politechnika Białostocka; Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

³⁾ Georgian Technical University, Tbilisi

*) Adres do korespondencji: jopaw@uwm.edu.pl

z nieregularnych trójkątów [5], bądź przez tzw. funkcję „patch”, czyli nakładanie płaszczyzny na chmurę punktów [6].

W celu pozyskania chmury punktów powszechnie używane są skanery impulsowe i fazowe. Różnią się one sposobem pomiaru odległości oraz orientacji punktów na skanie. Oba emitują wiązkę laserową, która po odbiciu od powierzchni obiektu powraca do instrumentu, będąc jednocześnie nośnikiem informacji o zeskanowanym punkcie [7]. Skanery impulsowe pozwalają na dokładniejsze pomiary i na uzyskanie satysfakcjonujących wyników na większej odległości. W skanerach fazowych uzyskuje się mniejszą dokładność, ale wystarczającą do przeprowadzenia miarodajnej inwentaryzacji.

W przedstawianych badaniach wykorzystano **skaner impulsowy**. W takich skanerach odległość obliczana jest na podstawie czasu, w jakim impuls przebywa dwukrotnie drogę od instrumentu skanującego do badanego obiektu i na podstawie wzoru (1) obliczana jest odległość:

$$d = (c \cdot t) / 2 \quad (1)$$

gdzie :

c – prędkość światła; t – mierzony czas;

d – odległość.

Drugim skanerem wykorzystanym w prezentowanych pomiarach jest **skaner fazowy**. Na podstawie różnicy bądź przesunięcia fazowego pomiędzy transmitowanym a odbieranym sygnałem oraz mierzonej wielokrotności N długości fali oblicza się odległość skanera od obiektu ze wzoru (2):

$$d = (N \cdot \lambda \cdot \Delta\lambda) / 2 \quad (2)$$

gdzie :

N – wielokrotność N długości fali;

λ – długość fali; $\Delta\lambda$ – przesunięcie fazowe;

d – odległość.

Oba skanery umożliwiają szybkie i precyzyjne tworzenie trójwymiarowych chmur punktów. Sterowane są za pomocą ekranów dotykowych, co umożliwia ustawianie parametrów, monitorowanie oraz kontrolę danych. Wbudowany kontroler oraz graficzny wyświetlacz pozwalają przeglądać skany oraz kontrolować ich jakość podczas pomiaru.

Wykonanie pomiarów alkierza i obróbka danych

Skanowanie laserowe często jest wykorzystywane do zinwentaryzowania układu elementów konstrukcyjnych i po-

mieszczeń wewnątrz budynku. W takich badaniach, poza określeniem geometrii, możliwe jest zidentyfikowanie obrazów czy informacji ukrytych dla wzroku rzeczoznawców realizujących badania. Pojedynczy skan jest źródłem informacji o elementach znajdujących się w obszarze opracowania, lecz w przypadku analizy całego pomieszczenia pomiar wykonany z jednego stanowiska okazuje się niewystarczający do uzyskania jego pełnej trójwymiarowej geometrii. Wykonując złożony pomiar z kilku stanowisk, należy zadbać o bardzo dobrą jakość połączenia danych z każdego stanowiska.

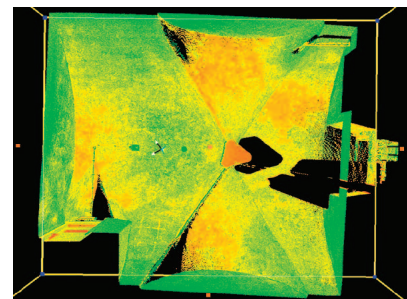
Pomiary wewnątrz zabytkowego alkierza zlokalizowanego w XVII-wiecznym obiekcie pałacowym wykonano dwoma skanerami: impulsowym oraz fazowym. Zastosowanie dwóch urządzeń, bazujących na różniących się technologiach pomiarowych, pozwoliło na weryfikację uzyskanych danych.

Przed przystąpieniem do pracy z urządzeniami pomiarowymi wykonano wizję lokalną pomieszczenia skutkującą dokładnym zaplanowaniem stanowisk pomiarowych. Zwiększenie liczby stanowisk pozwoliło na uzyskanie obrazu pomieszczenia z uniknięciem tzw. cieni, czyli dziur w chmurze punktów spowodowanych wzajemnym przysłanianiem się obiektów. Istotne jest prawidłowe zlokalizowanie stanowisk, aby wiązka lasera miała dostęp do każdego miejsca w pomieszczeniu. Sposób przygotowania i usytuowania urządzeń pomiarowych wpływa na dokładność uzyskanych wyników oraz na zminimalizowanie prawdopodobieństwa wystąpienia cieni w chmurze punktów, spowodowanych brakiem widoczności przez przysłonięcie innymi elementami znajdującymi się w pomieszczeniu, np. statyw stojący na celowej w kierunku ściany z oknem, uniemożliwia dotarcie wiązki lasera do ściany (fotografia 1), co skutkuje powstaniem „cienia” w kształcie trójkąta. Taki błąd został skompensowany wynikami uzyskanymi z innego stanowiska skanera.

Obraz w postaci chmury punktów może zostać zakłócony przez tzw. szumy, spowodowane przez elementy, które na krótko pojawiają się na celowej wiązki światła. Problem ten jest częsty w przypadku skanowania obiektów kubaturowych w miejscach, gdzie odbywa się intensywny ruch

pieszych czy pojazdów. Na etapie obróbki cyfrowej możliwe jest usunięcie wszystkich nieprawidłowych danych z chmury punktów, będących efektem wtargnięcia w zasięg lasera obiektu obcego.

Analizując cyfrowo uzyskaną chmurę punktów, zawierającą ok. 1 600 000 indywidualnych danych, otrzymano precyzyjny rzut poziomy komnaty (fotografia 2). Wykorzystując cyfrową konwersję uzyskanych danych do programów CAD lub BIM, możemy utworzyć zwymiarowany rysunek architektoniczny, a także model przestrzenny. W chmurach punktów można identyfikować dodatkowe informacje dotyczące zeskanowanej powierzchni. Chmura punktów zaprezentowana w kolorach intensywności odbicia wskazuje na zróżnicowaną wilgotność obiektu, co przejawia się czerwonymi kolorami punktów (fotografia 2). Możliwa jest również identyfikacja polichromii malowanych na powierzchni tynku lub

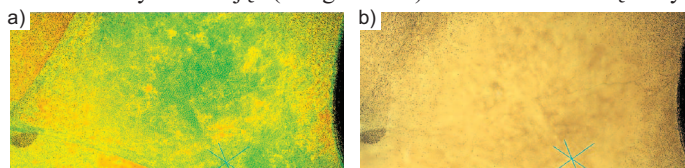


Fot. 2. Rzut poziomy komnaty; czerwony odcień chmury punktów świadczy o większej wilgotności materiału (widok na sufit z dołu)
Photo 2. Floor plan of the chamber; red tint of the point cloud indicates higher moisture content of the material (bottom view of the ceiling)

mur, ponieważ powierzchnia farby w specyficzny sposób odbija światło lasera, odmiennie niż pozostała część ściany czy stropu. Podczas badań kontrolnych, zrealizowanych w sąsiednich pomieszczeniach z widocznymi fragmentami fresków na sklepieniach ceglanych, potwierdzono, że skaner impulsowy jest narzędziem najbardziej odpowiednim do tego typu badań. W analizowanym obiekcie zrealizowane badania skaningowe nie potwierdziły obecności farb polichromii na analizowanych powierzchniach. W celu potwierdzenia lub zanegowania hipotez służb konserwatorskich dotyczących treści zawartych na zabytkowych powierzchniach konieczne będą dalsze analizy i dogłębne badania zebrałego materiału.

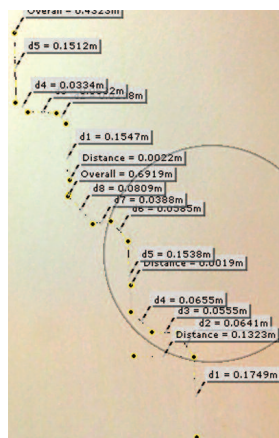
Identyfikacja spękań i zarysowań

Efektom pomiarów skaningowych było również uzyskanie obrazu układu zarysowań powierzchni tynku na sklepieniach ceglanych. Wyniki te mogą posłużyć do pomiaru wielkości uszkodzeń i analizy ewentualnych zagrożeń płynących z tego typu spękań. Widoczne są one zarówno na chmurze w kolorze intensywności odbicia (fotografia 3a), jak również w kolorach naturalnych uzyskanych ze zdjęć (fotografia 3b).



Fot. 3. Dane ze skanera: a) rysy widoczne na skanie w kolorze intensity; b) spękania na chmurze punktów w naturalnych kolorach
Photo 3. Data from the scanner: a) scratches visible in the scan with intensity mode; b) cracks on a cloud of points in natural colors

Na etapie digitalizacji danych uzyskanych z obu skanerów dokonano identyfikacji spękań na otrzymanych chmurach punktów. W celu prezentacji uzyskanych efektów przedstawiono jedno ze spękań, zarejestrowane z obu skanerów, z odległości ok. 1,5 m. W trakcie komputerowej obróbki chmur punktów wykonano pomiary szerokości rozwarcia szczeliny i jej długości. Dane ze skanera impulsowego opracowano programem Cyclone, a wynik pomiaru skanerem fazowym poddano obróbce w programie Scene (fotografia 4).



Fot. 4. Pomierzone spękanie: chmura punktów wykonana skanerem fazowym
Photo 4. Measured crack: point cloud made with a Faro scanner

Analizowane uszkodzenie jest pęknięciem „schodkowym”, przebiegającym po obrysie cegieł. Maksymalna szerokość pęknięcia wynosi 2 mm, a jego łączna długość w pionie i poziomie ok. 1,0 m. Rysa zamyka się na obu końcach. Wyniki pomiaru z obu skanerów różnią się prawie o 6 cm, co wynika z różnicy w dokładności rejestracji pęk-

Parametry pomiarów spękania i uzyskane wyniki

Crack measurement parameters and obtained results

Skaner	Rozdzielczość	Rozmiar skanu Hz x V [pkt]	Oświetlenie	Szerokość uszkodzenia [m]	Całkowita długość uszkodzenia [m]
Impulsowy	0,10 m na 100 m	907 x 1047	sztuczne	0,002	1,075
Fazowy	1,6 MPkty przy jakości 4x	996 x 1565	sztuczne	0,002	1,019
Różnica wyników pomiędzy skanerami [Δ]				0,000	0,056

nięcia przez skanery. Morfologia wstępnie zidentyfikowanych spękań powinna być szczegółowo zbadana np. z wykorzystaniem pomiaru prędkości fal ultradźwiękowych emitowanych przez elektrody betonoskopu. W przypadku wystąpienia stanu zagrożenia można za zgodą konserwatora zabytków przeprowadzić ograniczone badania niszczące w postaci lokalnych odkrywek.

Podsumowanie

Skaning laserowy, umożliwiający stworzenie chmury punktów, pozwala na odtworzenie kształtu istniejącego obiektu w wirtualnej rzeczywistości. Dane geometryczne o obiektach, uzyskane w bezinwazyjny sposób, można wykorzystać do przygotowania dokumentacji inwentaryzacyjnej obiektu czy informacji o jego stanie technicznym. Dzięki skaningowi laserowemu odwzorowuje się dokładnie obiekty o skomplikowanym kształcie i detalach. Uzyskane dane pozwalają na precyzyjną identyfikację spękań czy innych uszkodzeń widocznych na badanych powierzchniach. Istotny jest odpowiedni dobór sprzętu pomiarowego, gdyż parametry skanera i światła, jakie on emituje, mają ograniczony zakres badawczy. Badania skaningowe mogą być bardzo pomocne w identyfikacji uszkodzeń, wad konstrukcyjnych i monitoringu budowli. Pomiary spękań, które zwykle znajdują się w miejscach trudno dostępnych, są bezpieczne i możliwe przy wykorzystaniu urządzeń mobilnych. Zaletą metody nazwanego skaningiem laserowym jest fakt, że pomiary nie wymagają światła dziennego, czyli mogą być również prowadzone nocą lub w pomieszczeniach pozbawionych oświetlenia. Nie otrzymamy wówczas jednak zdjęć cyfrowych, niezbędnych do fotorealistycznego odtworzenia kolorystyki obiektu.

Budynki zabytkowe mają często rozbudowane bryły, skomplikowane formy architektoniczne i dużą liczbę detali zdobniczych, które trudno byłoby dokładnie zinwentaryzować klasycznymi narzędziami pomiarowymi. Chmury punktów zidentyfikowane w efekcie laserowego pomiaru alkierza, a następnie ich cyfrowa interpretacja z wykorzystaniem licencjonowanego oprogramowania, pozwoliły na dokładne odtworzenie kształtu każdego detalu, uszkodzenia i całej bryły zabytkowej komnaty.

Literatura

- [1] Ziaja D, Rachwał S, Nazarko P. Analiza statyczno-wytrzymałościowa modelu MES istniejącej hali z wykorzystaniem skaningu laserowego. Inżynieria i Budownictwo. 2020; 76.
- [2] Jurczak MA. Zastosowanie skaningu laserowego do inwentaryzacji obiektów zabytkowych. Materiały Budowlane. 2022. DOI: 10.15199/33.2022.05.06.
- [3] Razali AF, Ariff MFM, Majid Z, Darwin N, Aspuri A, Salleh MFM. Three-Dimensional (3D) As-Built Reconstruction from Laser Scanning Dataset. In 2020 IEEE 10th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET) 2020 (pp. 150-155). IEEE. DOI: 10.1109/ICSET51301.2020.9265360.
- [4] Markowski H. Zastosowanie skanowania laserowego 3D w inwentaryzacji budynków zabytkowych. Builder. 2020; 24. DOI: 10.5604/01.3001.0014.1378.
- [5] Izdebski W, Seremet A. Praktyczne aspekty infrastruktury danych przestrzennych w Polsce. Główny Urząd Geodezji i Kartografii, Warszawa 2021.
- [6] Bartonek D, Buday M. Problems of creation and usage of 3D model of structures and theirs possible solution. Symmetry. 2020 12(1): 181, <https://doi.org/10.3390/sym12010181>.
- [7] Janicka J, Rapiński J, Błaszczak-Bąk W, Suchocki C. Application of the Msplit estimation method in the detection and dimensioning of the displacement of adjacent planes. Remote Sensing. 2020; 12/19: 3203.

Publikacja powstała w wyniku odbywania przez Joannę Pawłowicz stażu w Georgian Technical University, Tbilisi (Gruzja), współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego (Program Operacyjny Wiedza Edukacja Rozwój), zrealizowanego w projekcie Program Rozwojowy Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie (POWR. 03.05.00-00-Z310/17).

Przyjęto do druku: 01.08.2022 r.