

dr hab. inż. Izabela Skrzypczak, prof. PRz¹⁾
ORCID: 0000-0003-0978-3040
dr hab. inż. Agnieszka Leśniak, prof. PK^{2)*}
ORCID: 0000-0002-4811-5574

Wybór metody pomiarowej do inwentaryzacji obiektu zabytkowego z zastosowaniem AHP

Measurement method selecting for inventory of heritage building using AHP

DOI: 10.15199/33.2022.11.29

Streszczenie. Wybór metody inwentaryzacji obiektu zabytkowego zależy od wielu czynników. Celem pracy był wybór najkorzystniejszej metody pomiarowej do inwentaryzacji rzeszowskiego Ratusza. Rozważano cztery metody pomiaru i dokonano ich oceny za pomocą pięciu kryteriów. Do wspomagania procesu decyzyjnego wykorzystano metodę analizy wielokryterialnej AHP. W przypadku analizowanego obiektu najkorzystniejszy okazał się naziemny skaniny laserowy. Zaprezentowano także wybrane elementy przeprowadzanego procesu inwentaryzacji.

Słowa kluczowe: inwentaryzacja; metoda pomiarowa; obiekt zabytkowy; AHP.

Abstract. The choice of a heritage building inventorying method depends on many factors. The aim of the work was to select the most advantageous measurement method for the Rzeszów Town Hall inventory. Four measurement methods were considered and assessed according to five criteria. The multi-criteria AHP method was used to support decision-making. Terrestrial laser scanning has proved to be the most advantageous for the analysed case. Selected elements of the on-going inventory process were also presented.

Keywords: inventory; measurement method; heritage building; AHP.

Przeprowadzenie inwentaryzacji jest podstawą i warunkiem wstępnym w przypadku zabezpieczenia zabytków przed skutkami destrukcyjnych oddziaływań naturalnych i antropogenicznych [1]. Należy dokładnie odwzorować rzeczywisty układ przestrzenny oraz określić strukturę techniczną i funkcjonalną obiektu. Pomimo norm i rozporządzeń regulujących techniczną dokumentację rysunkową odczuwalny jest brak sprecyzowanego standardu inwentaryzacji. Zupełnie odmiennie niż w przypadku dokumentacji projektowej, badań architektoniczno-konserwatorskich czy nadzorów konserwatorskich, inwentaryzacje pomiarowo-rysunkowe nie zostały objęte kontrolą jakościową. Ostatnie lata wykazały, że istotną rolę w jakości opracowań architektonicznych odgrywają stosowane techniki pomiarowe [2, 3], bazujące nie tylko na tradycyjnych metodach (pomiar dalmierzem), ale także na tachimetrii, fotogrametrii czy danych pozyskanych metodą skaniny laserowego. W zależności od potrzeb i charakteru obiektu wykorzystuje się różne metody lub ich kombinacje, zapewniając osią-

gnięcie dużej dokładności opracowania. Należy podkreślić, że decyzja dotycząca wyboru metody pomiarów wymaga analizy wielu czynników decydujących o sposobie inwentaryzacji obiektu.

Wybrane metody inwentaryzacji

Najbardziej tradycyjną metodą jest **pomiar ręczny**. Nie wymaga szczególnych umiejętności oraz kosztownego sprzętu, ale jest czasochłonny, podatny na błędy i pracochłonny [4]. **Tachimetria** jest techniką pozycjonowania w przestrzeni 3D. Oparta na wykorzystaniu tachimetrów elektronicznych pozwala na pomiar trzech elementów kierunku poziomego, kąta zenitalnego oraz odległości przestrzennej [5]. Praca tachimetrem wraz z dedykowanym oprogramowaniem znacznie przyspiesza wykonanie dokumentacji pomiarowo-rysunkowej, zachowując jej dużą dokładność. Jak zauważono w [6], praca w terenie trwać może nieco dłużej niż podczas pomiaru ręcznego, jednak natychmiast powstają rysunki rzutów, przekrojów i widoków. **Fotogrametria** pozwala na wyznaczenie kształtów, rozmiarów i położenia obiektów w przestrzeni na podstawie zdjęć fotogrametrycznych [5], wykonanych wysokiej klasy aparatami cyfrowymi zaliczanymi do kamer niemetrycznych oraz stosowanymi już od lat kame-

rami metrycznymi. Najważniejszymi zaletami fotogrametrii są: równoczesność fotograficznej rejestracji wszystkich szczegółów; krótki czas prac terenowych; dokumentalna wartość fotogramu. Wśród wad wymienia się kwestię wysokiej dokładności pomiaru, którą łatwiej osiągnąć za pomocą precyzyjnych instrumentów geodezyjnych, niż stosując standardową aparaturę fotogrametryczną.

Najefektywniejszą, ale najbardziej kosztowną jest metoda **skaniny laserowego 3D** polegająca na przenoszeniu rzeczywistego kształtu trójwymiarowego obiektu do postaci cyfrowej. Obecnie to jedna z nowoczesnych i szybkich metod pozyskiwania informacji o geometrii obiektów [7]. Pozwala na pozyskanie chmury punktów, a następnie generowanie dokumentacji cyfrowej, która umożliwia utworzenie modelu BIM skanowanego obiektu. W przypadku obiektów zabytkowych wykorzystuje się HBIM, uważane za obiecujące źródło informacji przed planowaniem konserwacji [8]. Pomimo wielu dostępnych rozwiązań technologicznych, pewne ograniczenia wprowadza wybór położenia skanera względem skanowanych obiektów np. [9]: skanowanie lotnicze zwiększa powierzchnię skanowanego obszaru, ale zmniejsza dokładność odwzorowania powierzchni pionowych; skaniny naziemny jest precyzyjny i gęsty, ale z po-

¹⁾ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury

²⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Łądowej

* Adres do korespondencji: agnieszka.lesniak@pk.edu.pl

ziomu gruntu brak jest możliwości pozyskania informacji np. o kształcie dachu, zaś skanowanie z poziomu platformy mobilnej zwiększa tempo pozyskiwania danych, ale nie eliminuje pozostałych ograniczeń skaningu naziemnego. Fotogrametria oraz skaning 3D w przeciwieństwie do metod tradycyjnych pozwalają wykonać pomiary w sposób bezkontaktowy, a utworzona dokumentacja umożliwia przedstawienie przestrzennego stanu obiektu i na modelu pozwala na przeprowadzenie pomiarów.

Wielokryterialny wybór metody pomiarowej

Do wyboru najkorzystniejszej metody pomiarowej spośród: pomiar tradycyjny, tachimetria, fotogrametria, skaning naziemny, zastosowano wielokryterialną analizę AHP (Analytic Hierarchy Process) opracowaną na przełomie lat 70. i 80. XX w. przez Saaty’ego [10]. Metoda ta bazuje na teorii użyteczności i jest powszechnie stosowanym narzędziem do podejmowania złożonych decyzji na podstawie przyjętych kryteriów. AHP pozwala łączyć kryteria kwantyfikowane z niekwantyfikowanymi oraz obiektywnie mierzalne z subiektywnymi. Opis teoretycznych podstaw metody można odnaleźć m.in. [10, 11].

Pierwszym krokiem analizy jest identyfikacja kryteriów determinujących wybór metody pomiarowej. Na kwestionariusz przesłany w terminie czerwiec – lipiec 2020 r. odpowiedziało 27 ekspertów z różnych środowisk: projektanci, wykonawcy oraz urbaniści. Zadaniem respondentów było utworzenie indywidualnej macierzy porównań kryteriów wykorzystującej skalę ocen Saaty’ego w celu ustalenia ich względnego pierwszeństwa. Zaproponowano 5 kryteriów oceny przydatności metody pomiarowej:

- A – geometria obiektu i warunki sytuacyjne determinujące przyjęcie metody pomiaru, np. brak sygnalizacji punktów kontrolnych;
- B – dokładność pomiarów inwentaryzacyjnych, w tym wpływ błędów obserwatora;
- C – zalety techniczne metody pomiarowej – złożoność pomiarowo-obliczeniowa;
- D – efektywność metody pomiaru – ilość pozyskanych informacji/ danych, dokumentalna wartość pozyskanych danych;

- E – koszt wykonania inwentaryzacji, w tym czas i koszt prac terenowych do czasu i kosztu prac laboratoryjnych/kameralnych.

W celu uzyskania ostatecznej macierzy porównań wyznaczono średnie wartości ocen zaproponowanych przez ekspertów. Macierz porównań, masy obliczeniowe i wagi poszczególnych kryteriów przedstawiono w tabelach 1, 2 i 3.

Tabela 1. Macierz porównań par kryteriów – M
Table 1. Comparison matrix of criteria pairs – M

Kryterium	A	B	C	D	E
A	1,000	0,333	5,000	6,000	5,000
B	3,000	1,000	6,000	7,000	6,000
C	0,200	0,167	1,000	3,000	1,000
D	0,167	0,143	0,333	1,000	0,250
E	0,200	0,167	1,000	4,000	1,000
Suma	4,567	1,810	13,333	21,000	13,250

Tabela 2. Normalizacja macierzy kryteriów i wartości wag – w_p, w przypadku poszczególnych kryteriów
Table 2. Standardization of criteria matrix and weight values – w_p for particular criteria

Kryterium	A	B	C	D	E	Waga
A	0,219	0,184	0,375	0,286	0,377	0,288
B	0,657	0,553	0,450	0,333	0,453	0,489
C	0,044	0,092	0,075	0,143	0,075	0,086
D	0,036	0,079	0,025	0,048	0,019	0,041
E	0,044	0,092	0,075	0,190	0,075	0,095
Suma	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabela 3. Ogólne wartości własne analizowanych kryteriów
Table 3. General eigenvalues of the analyzed criteria

Iloczyn macierzy (M · w)	(M · w) _i /w _i
1,606	5,570
2,731	5,583
0,445	5,178
0,212	5,117
0,486	5,095

Otrzymane wartości indeksu spójności CI (*consistency index*) = 0,077 macierzy porównania par oraz współczynnika spójności CR (*consistency ratio*) = 0,069 są mniejsze od 0,1, co wskazuje, że otrzymane wagi są spójne i mogą być wykorzystywane w procesie oceny i rankingu metod pomiarowych stosowanych w inwentaryzacji obiektów. Następnie eksperci ocenili przydatność wskazanych metod pomiarowych za pomocą poszczególnych kryteriów w stosunku do analizowanego obiektu budowlanego, jakim był Ratusz w Rzeszowie. Ocena dotyczyła istotności wpływu

danego kryterium w metodzie pomiaru. Zastosowano pięciostopniową skalę: 1 – znikoma; 2 – mała; 3 – średnia, 4 – duża i 5 – bardzo duża (tabela 4).

Tabela 4. Wartości kryteriów w przypadku poszczególnych metod pomiarowych

Table 4. Criteria values for individual measurement methods

Kryterium	Pomiar tradycyjny	Tachimetr	Fotogrametria	Skaning naziemny	Waga (w _i)
A	3	4	4	5	0,288
B	4	4	4	4	0,489
C	2	3	4	5	0,086
D	4	3	4	5	0,041
E	4	2	2	2	0,095

Wyniki obliczeń globalnych wskaźników preferencji (wg wzoru) oraz ranking poszczególnych metod pomiarowych przedstawiono w tabeli 5.

$$U_i = \sum_{k=1}^m u_{ik} \cdot w_k$$

gdzie:

- U_i – łączna użyteczność i-tego wariantu;
- u_{ik} – wartość użyteczności i-tego wariantu na podstawie przydzielonej oceny k-tego kryterium;
- w_k – waga k-tego kryterium.

Najkorzystniejszą metodą pomiaru okazała się technologia skaningu naziemnego, która uzyskała globalny wskaźnik – 4,225. Decydującymi czynnikami wyboru metody pomiarowej były: geometria obiektu i warunki sytuacyjne determinujące przyjęcie metody pomiaru, np. brak sygnalizacji punktów kontrolnych, zalety techniczne metody pomiarowej oraz efektywność metody pomiaru – ilość pozyskanych informacji/ danych, dokumentalna wartość pozyskanych danych.

Tabela 5. Ranking metod pomiarowych
Table 5. Ranking of the measurement method

Rodzaj metody pomiarowej	Wartość globalnego wskaźnika preferencji	Ranking
Pomiar tradycyjny	3,540	4
Tachimetr	3,682	3
Fotogrametria	3,809	2
Skaning naziemny	4,225	1

Zastosowanie skaningu laserowego do inwentaryzacji

Obiektem poddanym inwentaryzacji był budynek Ratusza zlokalizowany przy rynku w Rzeszowie. Data powstania budynku nie jest dokładnie określona. Przyjmuje się, że pierwotna bryła powstała w XVIII w., a następnie podlegała wielu zmianom. Jest to wolnostojący obiekt zbudowany na planie prostokąta, posiadający trzy kondygnacje nadziemne oraz podpiwniczenie. Jego bryła usy-

tuowana jest na osi wsch.-zach. Obiekt przykryty jest dachem wielospadowym z wyraźnie zaznaczonymi manierystycznymi szczytami, a elewacje zróżnicowane, z wieloma detalami architektonicznymi, w szczególności elewacja wschodnia pełniąc rolę frontu budowli.

Do pomiaru obiektu został wykorzystany naziemny skaningu laserowy (TLS). Zewnętrznych pomiarów dokonano z wykorzystaniem skanera laserowego Faro Focus 3D S120. Rozmieszczenie stanowisk pomiarowych i punktów dostosowania można znaleźć w [12]. Pozyskane dane poddane zostały wstępnej obróbce przez usunięcie z chmury punktów wszystkich zbędnych elementów (rysunek 1). Połączone chmury punktów posłużyły do stworzenia przestrzennego modelu rzeszowskiego Ratusza. Przy modelowaniu ograniczono się do frontalnej elewacji o największej liczbie de-



Rys. 1. Model wygenerowany w programie ReCap

Fig. 1. Generated model in the ReCap program

tali architektonicznych. Proces modelowania wykonano w środowisku Revit 2019. Dbając o odpowiednią czytelność chmury punktów, została ona wycięta tak, aby wczytać do programu tylko elementy niezbędne do wykonania wybranej elewacji (rysunek 2). Modelowaniu podlegały balkony, okna, gzymsy. Przyjęto, że większość elementów zostanie zamodelowanych z wykorzystaniem brył prostych. Niestety niektóre elementy były nietypowe i należało stworzyć własne rodziny odpowiadające kształtowi elementów widocznych na chmurze punktów. Efektem było opracowanie modelu 3D frontalnej elewacji rzeszowskiego Ratusza (rysunek 3).

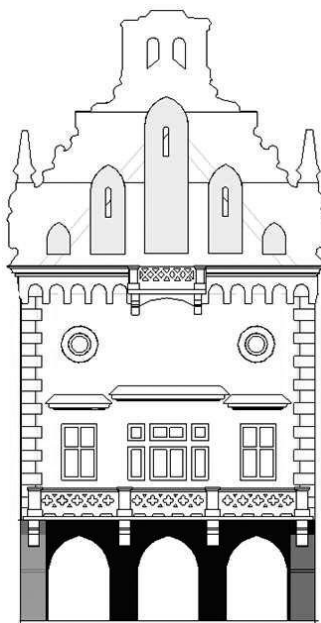
Podsumowanie

Wybór metody pomiaru w przypadku inwentaryzacji obiektu budowlanego zależy przede wszystkim od celu, jakie-



Rys. 2. Okrojona chmura punktów zaimportowana do programu Revit 2019

Fig. 2. Imported into Revit 2019 truncated point cloud



Rys. 3. Model elewacji Ratusza

Fig. 3. Facade model of the Town Hall

mu ma służyć, ale także od wielu innych czynników związanych m.in. z geometrią obiektu, jego lokalizacją, czasem trwania inwentaryzacji czy kosztami jej wykonania. W przypadku konieczności wyboru najkorzystniejszej metody pomiarowej właściwe jest wykorzystanie metod analizy wielokryterialnej bazującej na zdefiniowanych kryteriach oceny. Wykorzystanie w pracy metody AHP umożliwiło wybór metody najlepiej odpowiadającej analizowanemu obiektowi

wi – Ratuszowi w Rzeszowie i preferencjom zlecającego, a także uszeregowanie rozważanych metod pomiaru od najlepszej do najmniej korzystnej. Wybór metody skaningu naziemnego wydaje się właściwy i uzasadniony szczególnie w przypadku obiektów zabytkowych o skomplikowanej formie i wielu detalach architektonicznych, jak to było w przypadku analizowanego budynku. Warto podkreślić, że wykonana tą metodą inwentaryzacja może posłużyć do dalszych badań i ułatwi monitorowanie obiektu pod kątem ewentualnych zmian jego geometrii.

Literatura

- [1] Zawieska D. Rekonstrukcja 3D obiektów bliskiego zasięgu na podstawie zdjęć archiwalnych Archiwum Fotografii, Kartografii i Teledetekcji. 2008; 18: 717 – 726.
- [2] Pawłowicz JA. Chmura punktów jako podstawa wykonania dokumentacji architektonicznej obiektu. Materiały Budowlane. 2017; 537 (5): 49 – 50.
- [3] Gajewski J, Fajtek D. Zastosowanie wybranych technologii BIM w inwentaryzacji oraz projektowaniu konstrukcji budowlanych. Materiały Budowlane. 2020; 571 (3): 48 – 50.
- [4] Maalek R, Sadeghpour F. Accuracy assessment of Ultra-Wide Band technology in tracking static resources in indoor construction scenarios. Automation in Construction 2013; 30: 170 – 183.
- [5] <https://www.pgi.gov.pl/dokumenty-pig-pib-all/projekty/rid-projekt/7250-wytyczne3-geomonitoring-tom-1/file.html>, dostęp 08.06.2022, opracowanie: „Nowoczesne metody rozpoznania podłoża gruntowego w drogownictwie”.
- [6] Prarat M. Wykorzystanie tachimetrii i fotogrametrii w dokumentacji zabytków architektury na przykładzie inwentaryzacji pomiarowo-rysunkowej wybranych kamienic toruńskich. Acta Universitatis Nicolai Copernici Zabytkoznawstwo i Konserwatorstwo, 2015; 46: 509 – 531.
- [7] Bernasik J, Mikrut S. Fotogrametria inżynierska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska; Kraków 2007.
- [8] Bruno N, Roncella R. HBIM for Conservation: A New Proposal for Information Modeling. Remote Sens. 2019; 11: 175.
- [9] Warchoł A. Analysis of possibilities to registration TLS point clouds without targets on the example of the castle bridge in Rzeszów. In Proceedings of the 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, Albena, Bulgaria 2015; 1: 737–742.
- [10] Saaty TL. The Analytic Hierarchy Process. RWS Publications, Pittsburgh, 1998.
- [11] Prusak A, Stefanów P. AHP – analityczny proces hierarchiczny. Budowa i analiza modeli decyzyjnych krok po kroku. Wydawnictwo C. H. Beck, 2014.
- [12] Szawara Ł. Opracowanie modelu 3D w oparciu o wyniki pomiaru skanerem laserowym, praca dyplomowa pod kierunkiem T. Świętoń, Politechnika Rzeszowska, 2019.

Przyjęto do druku: 26.09.2022 r.