

dr inż. Joanna A. Pawłowicz¹⁾
ORCID: 0000-0002-1334-5361

Identyfikacja i modelowanie zniekształceń budynku zabytkowego na podstawie chmury punktów

Identification and modeling of distortions of a historical building based on a cloud points

DOI: 10.15199/33.2022.11.16

Streszczenie. Obiekty zabytkowe są często skomplikowane, co utrudnia pomiar i identyfikację zniekształceń. Z pomocą przychodzi technologia skaningu laserowego 3D, która w szybki sposób pozwala na zebranie danych geometrycznych dotyczących budynku. Efektem jest uzyskanie chmury punktów, którą poddano analizie z wykorzystaniem oprogramowania Leica Cyclone, AutoCad i ReCap. To studium przypadku pokazuje, że skaningu laserowego z powodzeniem może być wykorzystywany w identyfikowaniu zniekształceń występujących w budynkach.

Słowa kluczowe: skaningu laserowego 3D; geometria budynku; inwentaryzacja budowlana.

Abstract. Historic objects are often complex, which makes it difficult to measure or identify distortions. The technology of 3D laser scanning comes to the rescue, which allows you to quickly collect geometric data about the building. Its effect is to obtain a point cloud, which was analyzed using Leica Cyclone, AutoCad and ReCap software. This case study shows that laser scanning can be successfully used to identify distortions in buildings.

Keywords: 3D laser scanning; building geometry; building inventory.

Chmura punktów jest zbiorem danych występujących pod postacią trójwymiarową, która może posłużyć do późniejszego modelowania w przeznaczonym do tego programie. Taki typ danych zawiera informacje o położeniu zeskanowanych punktów. Każdy punkt jest opisany przez minimum trzy współrzędne: X, Y, Z, które umożliwiają ich lokalizację w otoczeniu. Trójwymiarowa chmura punktów jest zazwyczaj formą automatycznie pozyskanych informacji z procesu zbierania danych 3D, zwanego skanowaniem laserowym [1]. Zbiór punktów otrzymany w wyniku skanowania nazywany jest skanem. Po jego odpowiednim opracowaniu w programie komputerowym może posłużyć do stworzenia cyfrowej kopii rzeczywistego obiektu – tzw. cyfrowego bliźniaka. Następstwem tego jest pozyskanie materiału pozwalającego na wykonanie analiz geometrii budynku bez konieczności dalszej pracy w terenie.

Skaningu laserowego, jako nowoczesna forma pomiaru zdalnego, jest wygodną i wciąż rozwijającą się technologią. Zgodnie z rozporządzeniem [2] przez

pojęcie skaningu laserowego rozumie się: *metodę obrazowania powierzchni terenu, polegającą na pomiarze odległości między obiektem objętym pomiarem a skanerem, zainstalowanym na statku powietrznym, na samochodzie lub na stanowisku stacjonarnym, emitującym i odbierającym impulsy laserowe odbite od tego obiektu, z jednoczesnym wyznaczeniem współrzędnych przestrzennych (X, Y, Z), określających położenie tego urządzenia w przestrzeni, oraz kierunku promienia laserowego w momencie wysłania impulsu.* Skanery laserowe znajdują zastosowanie w procesach związanych m.in. z: nadzorem budowlanym [3], konserwacją zabytków [4] czy dokumentowaniem miejsc przestępstw [5]. Umożliwiają szybkie tworzenie trójwymiarowej dokumentacji skanowanych obiektów i otaczającej je przestrzeni.

W budownictwie pomiary skanerem mogą być wykorzystane nie tylko do odtwarzania geometrii obiektu, ale również wykrywania deformacji i kontroli odkształceń czy inwentaryzacji architektonicznych. Uzyskuje się dane, które są trudno osiągalne, ze względu na dostępność mierzonych elementów. Przykładem może być wysoki strop lub dach budynku. Wykonując pomiary ręcznie,

konieczne by było użycie drabin czy rusztowań, co może być niebezpieczne. Poza tym praca na wysokości utrudnia wykonanie dokładnych i szczegółowych pomiarów [6]. Dzięki chmurze punktów pozyskuje się materiał do przeprowadzenia kontroli pionowości słupów czy kolumn [7], a także zmian geometrycznych (przemieszczeń, deformacji, ugięć) w elementach poziomych [8]. Również wygodnie można zinventaryzować i pomierzyć spękania oraz ubytki w strukturze budynku [1].

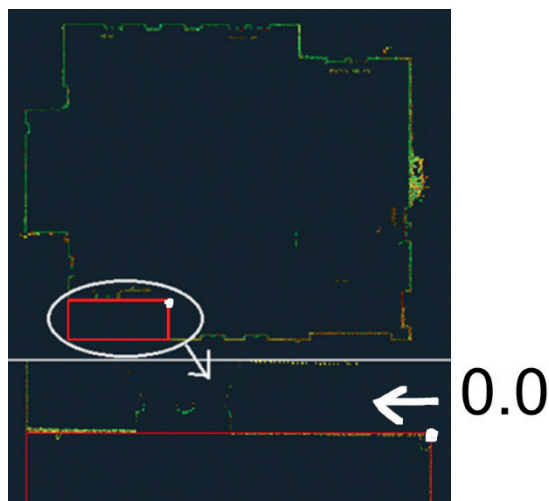
Pozyskanie i analiza chmury punktów

Chmura punktów jest zbiorem danych geometrycznych, uzyskanych z pomiaru skanerem laserowym w terenie, które w dowolny sposób można analizować po uprzednim zapisaniu ich na dysku komputera. Wykorzystując oprogramowanie do digitalizacji i przetwarzania danych, takie jak: Cyclone, ReCap oraz AutoCAD, możliwe jest porównanie skanu do dowolnych odniesień referencyjnych, np.: punktów, linii czy płaszczyzn. Dysponowanie oprogramowaniem, które pozwala na wyświetlanie i pracę z chmurami punktów, jest konieczne, dlatego często oprócz kupna urządzenia skanującego

¹⁾ Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Geoinżynierii; jopaw@uwm.edu.pl

należy zaopatrzyć się w odpowiednie oprogramowanie.

W artykule przedstawiono przykład wykorzystania chmur punktów do identyfikacji i modelowania zniekształceń budynku. Uzyskano je z pomiaru in situ skanerem laserowym 3D ScanStation C10. Dokładność wyznaczenia punktu w pionie i poziomie wynosiła 0,01 cm. Celem było pozyskanie danych o geometrii budynku objętego ochroną konserwatorską i odtworzenie jego elewacji. W trakcie pomiaru w terenie panowały dobre warunki pogodowe i nie zarejestrowano zakłóceń mogących wpłynąć na wynik pomiaru. Następnie dane zgrano na dysk komputera i poddano processingowi w oprogramowaniu Cyclone i ReCap. Po eksporcie danych skaningowych do AutoCAD zaobserwowano kilka interesujących „defektów”, które podczas wywiadu w terenie i na etapie procesu skanowania budynku nie były widoczne gołym okiem. Byłyby one również trudne do zaobserwowania i zmierzenia tradycyjnymi metodami pomiarowymi (np. taśmą). Pierwszą rzeczą, którą zauważono na chmurze punktów budynku, to brak prostopadłości ścian względem siebie (rysunek 1). Na rzucie obrysu budynku wyciętym z chmury punktów (żółta linia) wrysowano prostokąt w kolorze czerwonym pokrywający się z jednym z jego narożników. Stanowi on referencję do celów oceny, czy zachowany jest kąt prosty. Po lewej stronie widoczny

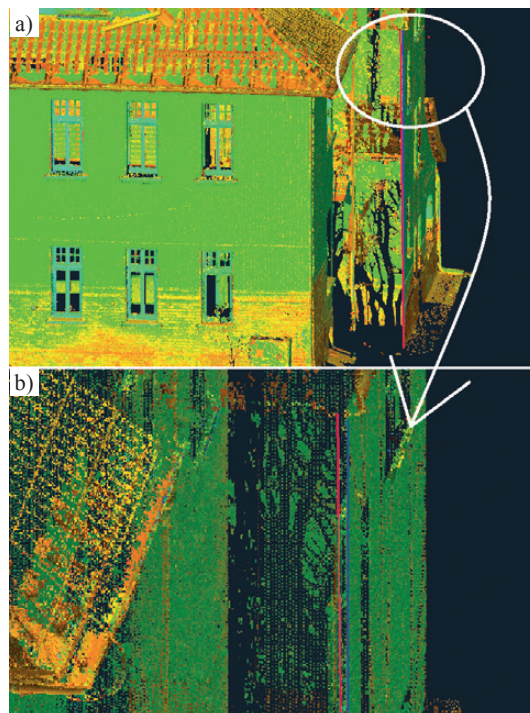


Rys. 1. Widoczny brak kąta prostego w narożniku budynku na obrysie rzutu i w powiększeniu
Fig. 1. Visible lack of a right angle in the corner of the building on the outline of the projection and when enlarged

jest jednak brak pokrycia linii czerwonej z żółtą. Świadczy to o braku prostopadłości ścian względem siebie. W związku z tym wykonano pomiar w chmurze punktów. Punkt początkowy (0.0) i kierunek pomiaru pokazano również na rysunku 1. Przyjęto, że na linii odciętych odkładano wartość 10 cm i w punkcie tym mierzono rzędną. W ten sposób otrzymano kolejne wartości rzędnych: 1,12, 2,09, 2,75, 3,79 i na końcu linii 4,29 cm (długość analizowanej ściany). Jak widać, kąt się rozwiera, a wyniki pomiaru udowadniają również, że płaszczyzna ściany nie jest równa.

Innym zauważonym defektem budynku jest odchylenie od pionu w przypadku większości ścian. Są to nieznaczne imperfekcje i praktycznie niemożliwe do uchwycenia w trakcie oględzin na żywo. Na rysunku 2 widoczne jest odchylenie od pionu jednego z narożników badanego zabytku. Od dołu narożnika wyprowadzono pionową czerwoną linię referencyjną w celu porównania jej z faktycznym przebiegiem tej krawędzi. W celu zwiększenia widoczności oznaczono ją linią niebieską na rysunku 2a. Jak zaprezentowano na zbliżeniu górnego fragmentu tego narożnika (rysunek 2b), jego odchylenie od pionu jest już bardzo dobrze widoczne. Zmierzono je na wysokości 766,41 cm od poziomu terenu, po ścianie zewnętrznej budynku i w tym przypadku wynosi 16,2 cm w kierunku na zewnątrz od tej ściany budynku.

Z chmury punktów wynika również skrócenie elementów poziomych badanego obiektu. Przykładem jest rynna na ele-



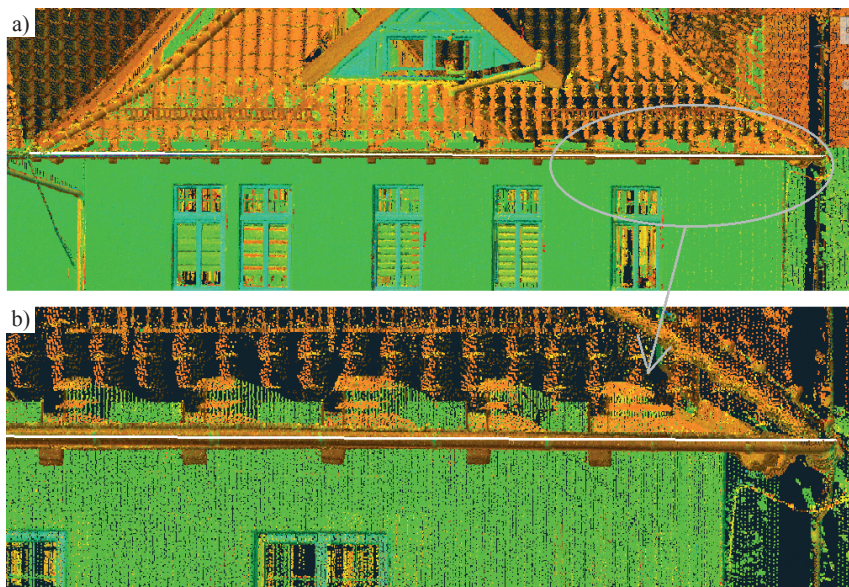
Rys. 2. Odchylenie w pionie narożnika budynku: a) chmura punktów z czerwoną linią referencyjną i niebieską linią krawędzi; b) zbliżenie na górę ściany w narożniku z widocznym odchyleniem od pionu

Fig. 2. Vertical deviation of the building corner: a) cloud of points with a red reference line and a blue edge line; b) approaching the top of the wall in the corner with a visible deviation from the vertical

wacji południowo-wschodniej. Gołym okiem to zniekształcenie jest niezauważalne i dopiero na chmurze punktów można zaobserwować odchylenie od pionu i poziomu, a także skrócenie podłużne (rysunek 3). Na rysunku 3a białym kolorem naniesiono linię referencyjną łączącą dwa końce górnej części rynny, a na rysunku 3b pokazano zbliżenie na jeden z jej końców. Porównując położenie białej linii z rzeczywistym położeniem rynny, widać jej przemieszczenie, które można wymodelować i zmierzyć.

Modelowanie odkształcenia w chmurze punktów

Dla niewprawnego oka widoczność deformacji rynny jest trudno dostrzegalna w chmurze punktów, dlatego podjęto próbę jej wymodelowania. W tym celu stworzono dwa modele analizowanego obiektu. Pierwszym z nich jest model rzeczywisty stanu rynny. W tym celu wykonano przekroje poprzeczne umieszczone co 20 cm wzdłuż jej osi podłużnej. Następnie połączono je

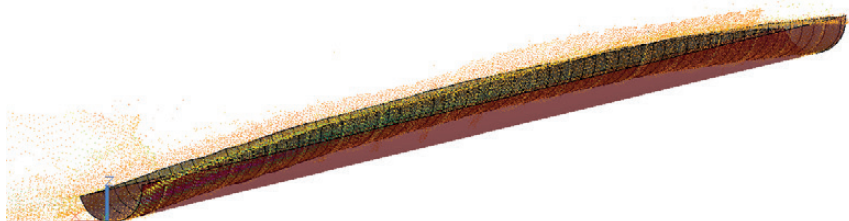


Rys. 3. Odształcenie rynny: a) rynna z naniesioną białą linią referencyjną; b) fragment rynny w zbliżeniu i widoczną deformacją
Fig. 3. Gutter deformation: a) gutter with a white reference line applied; b) fragment of the gutter close-up and visible deformation

w jeden model, który na rysunku 4 widoczny jest w kolorze czarnym. Drugim natomiast jest model referencyjny rynny w kolorze czerwonym. Można na nim zauważyć odształcenie i odsunięcie od niego wzorcowego modelu. Cały układ wpasowany został w chmurę punktów (kolor żółty) – rysunek 4. Jak można zauważyć, modele wzajemnie się pokrywają na początku i na końcu obiektu. W środkowej części rynny rzeczywisty model widocznie się podnosi i ulega odchyleniu w lewą stronę oraz skręceniu względem osi podłużnej rynny.

można również wygodnie zwymiarować zeskanowany obiekt. Dzięki uzyskanym skanom w łatwy sposób udało się zbadać deformacje i uszkodzenia – nawet te, których nie jesteśmy w stanie zauważyć w trakcie wizji w terenie. Dodatkowo na podstawie chmury punktów można opracować dokumentację inwentaryzacyjną, a ze skaningu odczytać wymiary oraz obliczyć powierzchnie poszczególnych elementów.

Należy stwierdzić, że skaner laserowy jest bardzo dobrym narzędziem do zbierania danych i tworzenia dokumen-



Rys. 4. Modelowanie odształcenia poziomego i skręcenia rynny
Fig. 4. Modeling the horizontal deformation and twist of the gutter

Podsumowanie i wnioski

Przedstawiony przypadek potwierdza przydatność technologii skanowania laserowego 3D w badaniu zniekształceń budynków. Można stwierdzić, że zebrana chmura punktów okazała się bardzo dobrym źródłem danych o geometrii zabytkowego budynku. Na podstawie pozyskanych danych w prosty sposób

tacji inwentaryzacyjnej budynku zabytkowego. Chmura punktów dokładnie odzwierciedla geometrię obiektu, co ułatwia pozyskanie wymiarów w trudno dostępnych miejscach. Minusem jest to, że praca z danymi oraz ich analiza i modelowanie wymaga często zakupu specjalistycznego oprogramowania komputerowego. Na korzyść tej me-

tody przemawia jednak to, że raz uzyskane dane skaningowe mogą posłużyć w późniejszym czasie do wykonania wielu analiz i opracowań bez potrzeby ponownego wychodzenia w teren. Mogą również być podstawą do odtworzenia obiektu w przypadku jego fizycznej destrukcji.

Literatura

[1] Pawłowicz JA. 2017. Chmura punktów jako podstawa wykonania dokumentacji architektonicznej obiektu. *Materiały Budowlane* 537(5): 49–50. DOI: 10.15199/33.2017.05.19.

[2] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z 9 listopada 2011 r. w sprawie standardów technicznych wykonywania geodezyjnych pomiarów sytuacyjnych i wysokościowych oraz opracowywania i przekazywania wyników tych pomiarów do państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego, Dz.U. nr 263 poz. 1572.

[3] Zima K. Technologia building information modeling w pracy inspektora nadzoru inwestorskiego. *Przegląd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*. 2017; 26(2):76.

[4] Mitka B. Możliwości zastosowania naziemnych skanerów laserowych w procesie dokumentacji i modelowania obiektów zabytkowych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*. 2007; 17.

[5] Maksymowicz K, Żoła MM, Kościuk J, Dawidowicz B. Dokumentowanie przebiegu i wyników eksperymentu procesowo-kryminalistycznego oraz możliwości przeprowadzenia wirtualnego eksperymentu procesowego przy zastosowaniu technik laserowego skanowania 3D. *Archiwum Medycyny Sądowej i Kryminologii*. 2010; 60(4).

[6] Wardach M, Krentowski J, Mackiewicz M. Evaluation of precast beam deflections resulting in cracks in curtain walls. *Engineering Failure Analysis*. 2022; 140:1–11. <http://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106568>

[7] Zhou W, Guo H, Li Q, Hong T. Fine Deformation Monitoring of Ancient Building Based on Terrestrial Laser Scanning Technologies, 35th International Symposium on Remote Sensing of Environment. 2014; 17.

[8] Löhmus H, Ellmann A, Märdla S, Idnurm S. Terrestrial laser scanning for the monitoring of bridge load tests—two case studies. *Survey Review*. 2018; 50 (360):270-284.

Publikacja została napisana w wyniku odbycia stażu w Universitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTECH Departament de Matemàtiques EPSEB, UPC, (Hiszpania) współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego (Programu Operacyjnego Wiedza Edukacja Rozwój), zrealizowanego w projekcie Program Rozwojowy Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie (POWR.03.05.00-00-Z310/17).

Przyjęto do druku: 30.09.2022 r.