

dr hab. inż. Artur Piekarczyk, prof. Instytutu<sup>1\*)</sup>

ORCID: 0000-0003-0988-4511

mgr inż. Aleksandra Mazurek<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0002-7027-9612

# The use of vision measurement techniques in the process of modernization and renovation of buildings

## *Wykorzystanie wizyjnych technik pomiarowych w procesie modernizacji i renowacji budynków*

DOI: 10.15199/33.2024.11.17

**Abstract.** The article presents an innovative approach to the process of planning, renovating, and modernizing buildings by using vision techniques for measuring and imaging detailed and volumetric objects. We present the advantages and application potential of vision-based measurement techniques in the context of growing needs for implementing fast and accurate methods for diagnosing the technical condition of objects. Through several examples, we discuss various 3D scanning techniques and methods of processing digital data that can be used to recreate project documentation and numerical simulations.

**Keywords:** 3D scanning; digitization of objects; scanning techniques of retail and cubature objects.

**Streszczenie.** Artykuł prezentuje nowatorskie podejście do procesu planowania, renowacji i modernizacji budynków przez zastosowanie technik wizyjnych do pomiaru i obrazowania obiektów detalicznych oraz kubaturowych. Przedstawiamy zalety i potencjał aplikacyjny wizyjnych technik pomiarowych w kontekście rosnących potrzeb na wdrożenie szybkich i dokładnych metod diagnostyki stanu technicznego obiektów. Na przykładach omawiamy różne techniki skanowania 3D oraz metody obróbki danych cyfrowych, które mogą być wykorzystane do odtworzenia dokumentacji projektowej i symulacji numerycznych.

**Słowa kluczowe:** skanowania 3D; digitalizacja obiektów; techniki skanowania obiektów detalicznych i kubaturowych.

3D scanning technology is developing rapidly in all areas of technology and science [1, 2]. One of the primary applications in civil engineering is the acquisition of digital images of large cubic structures and engineering and technical infrastructure [3, 4]. Scanning is a process that allows optical registration of the geometry of physical objects [5]. The information is captured and stored digitally as a cloud of points, pinpointing the precise position of each other's objects in space. The points are then combined into a grid of triangular elements to create a three-dimensional image of the geometry. All data are written as a numerical STL file [6], which can be further modified as required.

Modern scanning techniques use a variety of projection units, including laser scanners, structured light scanners, and infrared scanners [7]. Passive scanners are used for scanning large objects, e.g., buildings and engineering structures, because of their efficiency and relatively good imaging accuracy. For scanning small features and details, scanners operating with laser or structured light are used. This technique allows image acquisition of three-dimensional objects with complex structure and small dimensions [8]. A typical scanner consists of two main modules: a projector that generates a beam of light and a head equipped with a set of sensitive

Technika skanowania trójwymiarowego rozwija się bardzo dynamicznie w każdej dziedzinie techniki i nauki [1, 2]. Jednym z podstawowych zastosowań w inżynierii lądowej jest pozyskiwanie cyfrowego obrazu dużych obiektów kubaturowych i infrastruktury inżynierskiej oraz technicznej [3, 4]. Skanowanie jest procesem umożliwiającym optyczne rejestrowanie geometrii obiektów fizycznych [5]. Informacja jest przechwytywana i zapisywana cyfrowo jako chmura punktów, precyzyjnie określając wzajemne położenie obiektów w przestrzeni. Następnie punkty są łączone w siatkę trójkątnych elementów, co pozwala na stworzenie trójwymiarowego obrazu geometrii. Wszystkie dane są zapisywane w formie pliku numerycznego STL [6], który może być dalej modyfikowany w zależności od potrzeb.

Współczesne techniki skanowania wykorzystują różnorodne jednostki projekcyjne, w tym skanery laserowe, skanery światła strukturalnego oraz skanery podczerwone [7]. Do skanowania dużych obiektów, np. budynków i obiektów inżynierskich, stosuje się skanery pasywne ze względu na ich wydajność i dobrą dokładność obrazowania. Do skanowania niewielkich elementów oraz detali wykorzystuje się skanery operujące laserem lub światłem strukturalnym. Technika ta umożliwia pozyskiwanie obrazowania obiektów trójwymiarowych o skomplikowanej budowie i małych gabarytach [8]. Typowy skaner składa się z dwóch głównych modułów: projektora generującego wiązkę światła oraz głowicy wyposażonej w zestaw

<sup>1)</sup> Instytut Techniki Budowlanej

<sup>\*</sup>) Correspondence address: a.piekarczyk@itb.pl

cameras that record changes in the intensity of light reflected from the object being scanned.

The choice of projection unit affects the type and quality of the images obtained. Laser light with blue and red wavelengths is considered the most precise imaging method. It allows the scanning of complex, small to medium-sized objects, such as internal combustion engines or sculpture details. In this technique, the test object is illuminated by beams of laser beams and reference points, which are small reflective stickers called markers, which are required for a correct scan. The advantage of laser scanning is its continuity, which means that successive images are generated without losing track of the projection path. This method allows the shape of the object to be mapped, without being able to take into account the actual colour or textures of the surface. The accuracy of laser scanning is usually in the range of 0.02 mm to 0.05 mm.

**Structured light scanners** use an LED projector to illuminate test objects. This type of scanner can be operated manually or mechanically and is ideal for imaging small-scale items such as architectural details. Light of a specific surface extent is projected onto the surface of the object being scanned, and heads with sensitive cameras record changes in light intensity to create a point cloud. The advantage of this technique is that the textures and colours of the scanned object can be reproduced, which is particularly useful when scanning coloured objects or graphics. Creating stability and continuity can be a challenge. It requires the precise synchronisation of acquired images. The accuracy of this type of scanning is usually in the range of 0.04 mm to 0.05 mm.

Another class of scanners are **cubic imaging devices**, which are used in the digitisation of buildings, engineering structures, or large rooms. This type of scanner uses light projections in an infrared band that is invisible to humans. The scanner sends a beam of light, and sensitive cameras capture the part reflected from objects. The image is taken from several positions and then assembled into a three-dimensional model using special software. The scanner range can reach up to 350 m, with imaging accuracy ranging from 1 mm to 3 mm. Volume scanners enable comprehensive 3D imaging of entire buildings, including their surroundings, which is particularly important for the digitisation of historic buildings and other industrial and scientific applications.

### The Role of 3D scanning: inventory, digitisation, restoration

The Notre Dame Cathedral fire occurred in April 2019 [9], which caused significant damage to the architecture of this historic building. Four years earlier, in 2015, **Andrew Tallon**, an art historian and passionate advocate of new technologies, digitised the cathedral. This set of precise numerical data became a key tool in the restoration of the cathedral, allowing all of its original architectural details to be preserved. The lack of these data would have limited conservators to traditional documentation based on photography alone, which in turn would have significantly increased the difficulty of reconstructing the architecture with due accuracy.

czułych kamer, które rejestrują zmiany natężenia światła odbitego od skanowanego obiektu. Wybór jednostki projekcyjnej ma wpływ na rodzaj i jakość uzyskiwanych obrazów. Światło lasera, zarówno o długości fali niebieskiej, jak i czerwonej, jest uznawane za najbardziej precyzyjną metodę obrazowania. Pozwala to na skanowanie obiektów o skomplikowanej budowie oraz małych i średnich gabarytach, jak np. silniki spalinowe czy detale rzeźb. W tej technice, obiekt testowy jest oświetlany wiązkami promieni lasera, a do wykonania poprawnego skanu niezbędne są punkty referencyjne, czyli niewielkie odbłaskowe naklejki zwane markerami. Zaletą skanowania laserowego jest jego ciągłość, co oznacza, że kolejne obrazy są generowane bez utraty śledzenia ścieżki projekcyjnej. Metoda ta pozwala na odwzorowanie kształtu obiektu bez możliwości uwzględnienia rzeczywistych barw czy tekstur powierzchni. Dokładność skanowania laserowego wynosi 0,02 – 0,05 mm.

**Skanery wykorzystujące światło strukturalne** do oświetlania obiektów testowych stosują projektor LED. Ten rodzaj skanerów może być obsługiwany manualnie lub mechanicznie i jest idealny do obrazowania elementów o niewielkich gabarytach, takich jak detale architektoniczne. Światło o określonym zasięgu powierzchniowym jest wyświetlane na powierzchni skanowanego obiektu, a głowice z czułymi kamerami rejestrują zmiany natężenia światła, co umożliwi utworzenie chmury punktów. Zaletą tej techniki jest możliwość odwzorowania tekstur i barw skanowanego obiektu, co jest szczególnie przydatne przy skanowaniu kolorowych obiektów lub grafik. Uzyskanie stabilności i ciągłości obrazowania może być wyzwaniem. Wymaga precyzyjnej synchronizacji pozyskanych obrazów. Dokładność skanowania tego typu mieści się zazwyczaj w przedziale 0,04 – 0,05 mm.

Inną klasą skanerów są **urządzenia służące do obrazowania kubaturowego**, które znajdują zastosowanie w digitalizacji budynków, obiektów inżynierskich czy dużych pomieszczeń. Skanery tego typu wykorzystują projekcję światła w pasmie podczerwonym, niewidocznym dla człowieka. Skaner wysyła wiązkę światła, a czułe kamery rejestrują część odbitą od obiektów. Obrazowanie jest realizowane z kilku pozycji, a następnie składane w model trójwymiarowy za pośrednictwem specjalnego oprogramowania. Zasięg skanera może sięgać nawet do 350 m, a dokładność obrazowania wynosi 1 – 3 mm. Skanery kubaturowe umożliwiają kompleksowe obrazowanie 3D całych budynków wraz z ich otoczeniem, co ma szczególne znaczenie przy digitalizacji obiektów zabytkowych oraz w innych zastosowaniach przemysłowych i naukowych.

### Rola skanowania 3D: inwentaryzacja, digitalizacja, odtworzenie

W kwietniu 2019 r. miał miejsce pożar katedry Notre Dame w Paryżu [9], który spowodował znaczne zniszczenia w architekturze tego historycznego obiektu. Cztery lata wcześniej, w 2015 r., **Andrew Tallon**, historyk sztuki i pasjonat nowych technologii, przeprowadził cyfrową digitalizację katedry. Zestaw precyzyjnych danych numerycznych stał się kluczowym narzędziem przy jej odbudowie, pozwalając na zachowanie wszystkich oryginalnych detali architektonicznych. Brak tych danych ogra-

3D scanning is an innovative imaging technique that makes it possible to digitise virtually any object with great precision. Through this process, digital copies of objects can be used to catalogue engineering structures and monuments. Each element of the 3D model can be freely modified, which is useful during the restoration, reconstruction, or conservation processes of objects. Furthermore, digital copies do not have a limitation on the amount of reproduction, which guarantees the preservation of data quality.

**The 3D scanning process** starts with the acquisition of a 3D image in the form of a point cloud, which is then converted into triangular meshes that form the visible surface of the model. The result is a numerical file that is usable for graphics programmes. Such a file can be used as a digitisation of the object for archival purposes or as a model for 3D printing. When the model is to be used to predict the strength of a component, a further step is required, which is reverse engineering. This involves recreating the geometry of the model in the computational software and then supplementing the model with additional parameters, such as material properties. The final step is to perform numerical calculations.

### Volume and Retail Object Imaging

In June 2023, a disused post-production hall in poor condition was digitised (photo 1). The main part of it is a partially basement six-bay post-production hall, with a pilaster roof in emergency condition. The roof is supported by brick walls and riveted steel columns. All columns are terminated with Y-shaped heads made of sheet metal. The external walls of the ground floor are made of brick, with numerous damages, and the ceiling above the basement is made of bricks and steel beams, supported by walls and columns. The building was built indirectly on load bearing soil. Part of the building is under conservation protection.

For the scanning of the site, an automatic-operated passive cubic scanner was used for 3D laser inventory of both the interior and exterior of buildings. Photo 2 shows the selected graphics from the cubic image. On the basis of the three-dimensional image of the object, reverse engineering processing was performed. A three-dimensional, fully scalable model of the object (drawing) was obtained, which includes the external outline of the solid with all details and the arrangement of the internal structural elements.

In addition, a scan of the structural detail of the selected two-branch column with riveted joints was taken (Photo 3). A manually operated active scanner with a blue laser was used.

In another process, a CAD model was prepared for numerical calculation using the finite element method.

The numerical model was prepared for analysis in the numerical software ANSYS [10]. Fig. 2a shows a scan of a structural element with structural details, and Fig. 2b shows a model of the element reconstructed by reverse engineering.

niezałby konserwatorów zabytków do tradycyjnej dokumentacji, bazującej jedynie na fotografiach, co znacznie zwiększyłoby trudność odtworzenia architektury z należytą dokładnością.

Skanowanie 3D to innowacyjna technika obrazowania, która umożliwia digitalizację praktycznie każdego obiektu z ogromną precyzją. Dzięki temu procesowi, cyfrowe kopie obiektów mogą być wykorzystywane do katalogowania inżynierskich konstrukcji i zabytków. Każdy element modelu 3D może być dowolnie modyfikowany, co jest przydatne podczas procesów renowacji, rekonstrukcji czy konserwacji obiektów. Dodatkowo, cyfrowe kopie nie mają ograniczeń, jeśli chodzi o liczbę powielenia, co gwarantuje zachowanie jakości danych.

**Proces skanowania 3D** zaczyna się od pozyskania obrazu trójwymiarowego w postaci chmury punktów, które następnie są przekształcane na trójkątne siatki tworzące widoczną powierzchnię modelu. W rezultacie powstaje plik numeryczny wykorzystywany w programach graficznych. Taki plik może być używany jako digitalizacja obiektu do celów archiwalnych lub jako model do wydruku 3D. W przypadku, gdy model ma być wykorzystany do predykcji wytrzymałości elementu, konieczne jest przeprowadzenie kolejnego etapu, jakim jest inżynieria odwrotna. Polega ona na odtworzeniu geometrii modelu w programie obliczeniowym, a następnie uzupełnieniu modelu o dodatkowe parametry, takie jak właściwości materiału. Ostatecznym krokiem jest przeprowadzenie obliczeń numerycznych.

### Obrazowanie obiektu kubaturowego i detalicznego

W czerwcu 2023 r. przeprowadzono digitalizację nieużytkowanej hali przemysłowej w złym stanie technicznym (fotografia 1). Główną jej część stanowi częściowo podpiwniczona sześcioboczna hala poprodukcyjna, z dachem pilastrowym w stanie awaryjnym. Dach oparty jest na ścianach murowanych z cegły i nitowanych słupach stalowych. Wszystkie słupy zakończone są głowicami w kształcie litery Y wykonanymi z blachy. Ściany zewnętrzne parteru wykonane są z cegły, z licznymi uszkodzeniami, a strop nad piwnicą z cegieł i belek stalowych, podpartych ścianami i słupami. Budynek posadowiono bezpośrednio na gruntach nośnych. Część obiektu jest objęta ochroną konserwatorską.

Do skanowania obiektu użyto pasywnego skanera kubaturowego o obsłudze automatycznej, przeznaczonego do laserowej inwentaryzacji 3D obiektów zarówno wewnątrz, jak i na zewnątrz. Fotografia 2 pokazuje wybrane grafiki z obrazowania kubaturowego. Na podstawie trójwymiarowego obrazu obiektu przeprowadzono procesowanie metodą inżynierii odwrotnej. Uzyskano trójwymiarowy, w pełni skalowalny model obiektu (rysunek 1), który zawiera zewnętrzny obrys bryły ze wszystkimi detalami oraz rozmieszczenie wewnętrznych elementów konstrukcyjnych.

Dodatkowo wykonano skan detalu konstrukcyjnego wytopowanego słupa dwugłęziowego z połączeniami nitowanymi (fotografia 3). Zastosowano skaner aktywny z obsługą manualną, który wykorzystuje niebieski laser. W dalszym procesie został przygotowany model CAD do obliczeń numerycznych metodą elementów skończonych.



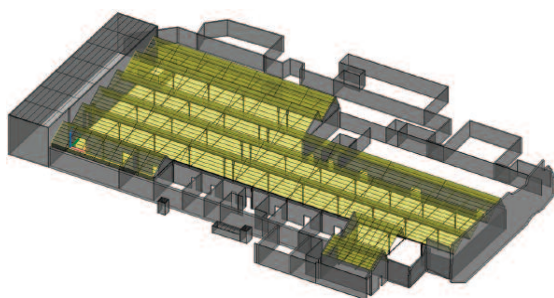


**Photo 1. The production hall – current condition of the facility**  
*Fot. 1. Hala produkcyjna – obecny stan obiektu*



**Photo 2. Scan image from outside and inside the hall**  
*Fot. 2. Obraz skanu z zewnątrz i wewnątrz hali*

The purpose of the calculations was to determine the stability and load bearing capacity of the column. Subsequently, the results of the calculations can be used in the design of the facility upgrade. A full numerical model was adopted for the calculations, taking into account the actual dimensions of the components and connections. As the building dates from the mid-19th century and no source



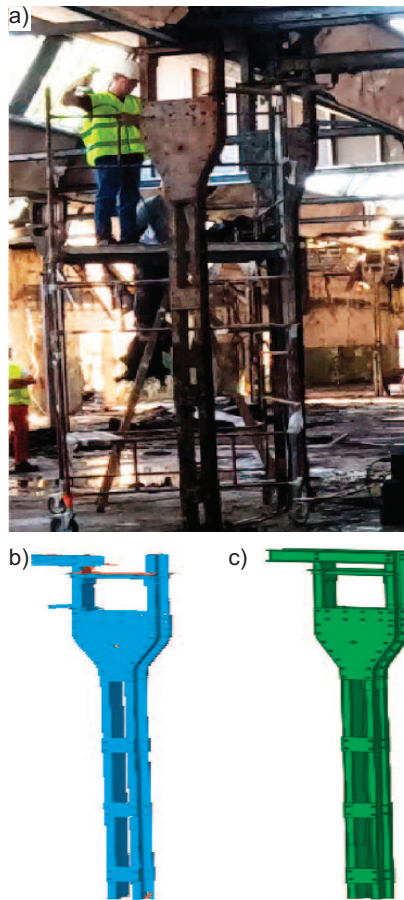
**Fig. 1. Three-dimensional CAD model**  
*Rys. 1. Trójwymiarowy model CAD*

Model numeryczny został przygotowany do analizy w programie numerycznym ANSYS [10]. Na rysunku 2a przedstawiono skan elementu konstrukcyjnego wraz ze szczegółami konstrukcyjnymi, a na rysunku 2b model elementu odtworzony metodą inżynierii odwrotnej. Celem obliczeń było określenie stateczności i nośności słupa. W dalszej kolejności wyniki obliczeń mogą być wyko-



documents on the materials used have survived, it is difficult to decipher the grade of steel. Laboratory or field tests were performed. In this article, it was assumed to be St37.12 steel grade [11], with a yield strength of 240 MPa and a strength of 370 MPa. In addition, an elastic-plastic model without reinforcement was adopted for the calculations. Contact-type connections were used between the column components (gusset plates, battens, branches, connectors, etc.). [12]. The load is applied to the head branch by means of an incremental displacement. The analysis is performed using a non-linear method. The illustrative results of the calculations are shown in Figure 3.

The results of the calculations make it possible to analyse the global stress state as well as the stresses of individual components such as the gusset plate and the battens. Figure 6 shows an example of the extent of the stress zones. The calculations show that at a compressive load corresponding to the critical force, there are no reduced stresses greater than 260 MPa throughout the model. Elevated stresses and their concentrations occur in the branches of the column, especially in the area of the gusset plate. The possible stress on the column requires strengthening of the branches.



**Photo 3. Construction detail: a) two-branch steel column; b) 3D scan; c) CAD model**  
 Fot. 3. Detal konstrukcyjny: a) słup stalowy dwugłęziowy; b) skan 3D; c) model CAD

rzystane w projekcie modernizacji obiektu. Do obliczeń przyjęto pełny model numeryczny z uwzględnieniem rzeczywistych wymiarów elementów składowych i połączeń. W związku z tym, że obiekt pochodzi z połowy XX wieku i nie zachowały się dokumenty źródłowe dotyczące użytych materiałów, trudno jest określić gatunek stali. Nie wykonano też żadnych testów laboratoryjnych ani polowych. Na użytek artykułu przyjęto, na podstawie [11], stal gatunku St37.12 o granicy plastyczności 240 MPa i wytrzymałości 370 MPa. Dodatkowo do obliczeń przyjęto model sprężysto-plastyczny bez wzmocnienia. Pomędzy częściami składowymi słupa (blachy węzłowe, przewiązki, gałęzie, łączniki itp.) zastosowano połączenia typu kontaktowego [12]. Obciążenie przyłożone jest do gałęzi głowicy słupa za pomocą przyrostowego przemieszczenia. Analiza wykonana jest metodą nieliniową. Poglądowe wyniki obliczeń przedstawia rysunek 3.

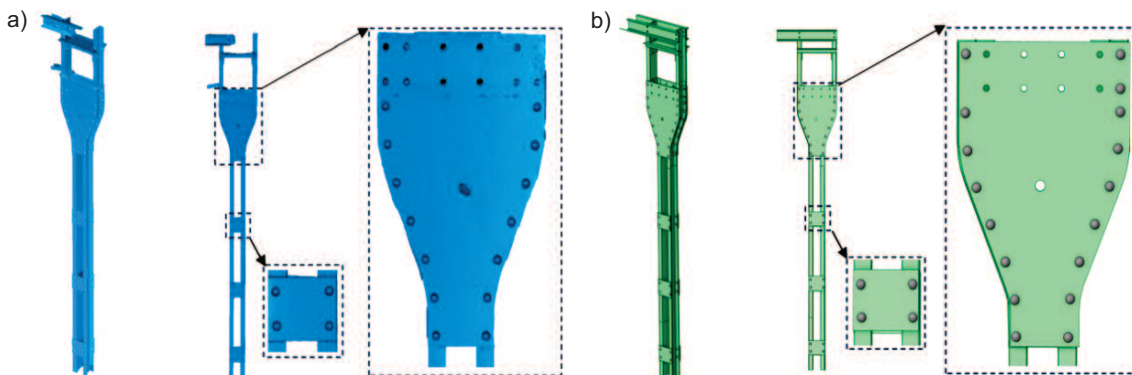
Wyniki obliczeń umożliwiają analizę globalnego stanu wyężenia oraz wyężenia pojedynczych elementów składowych, takich jak blacha węzłowa czy przewiązka. Z obliczeń wynika, że przy obciążeniu ściskającym odpowiadającym sile krytycznej w całej objętości modelu nie występują naprężenia zredukowane o wartości większej niż 260 MPa. Zwiększone naprężenia oraz ich koncentracje występują w gałęziach słupa, szczególnie w okolicy blachy węzłowej. Ewentualne dociążenie słupa wymaga wzmocnienia gałęzi.

## Summary

3D scanning enables the acquisition of object geometry data with previously unattainable accuracy and quality. The process is particularly useful for digitising complex geometries, where there are many details in large spaces. An example of this is an industrial hall that was 3D scanned both externally and internally to reconstruct its technical documentation and

## Podsumowanie

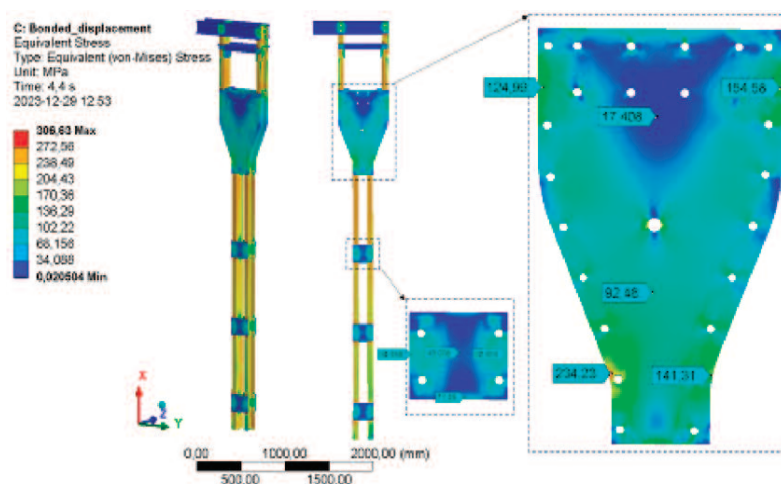
Skanowanie 3D umożliwia pozyskiwanie danych o geometrii obiektów z nieosiągalną dotychczas dokładnością i jakością. Proces ten jest szczególnie przydatny do digitalizacji skomplikowanych geometrii, gdzie znajduje się wiele detali



**Fig. 2. Structural column: a) 3D scan; b) CAD model**  
 Rys. 2. Słup konstrukcyjny: a) skan 3D; b) model CAD

identify damage. In addition to locating structural elements, 3D scanning also allows the shape, size, and topography of the damage to be recorded. This detailed information is important to assess the risk of structural failure or disaster during the operation and maintenance of structures.

An important aspect of 3D scanning is the ability to accurately reproduce structural details. This is illustrated by the example of a load-bearing column. 3D scanning provides precise data on the geometry of the model. With reverse engineering, these data can be processed to produce faithful copies of digital models that can be used in numerical calculations.



**Fig. 3. Results of numerical calculations**  
*Rys. 3. Wyniki obliczeń numerycznych*

w dużych przestrzeniach. Przykładem jest hala przemysłowa, która została poddana skanowaniu 3D zarówno zewnętrznemu, jak i wewnętrznemu, w celu odtworzenia jej dokumentacji technicznej oraz identyfikacji uszkodzeń. Oprócz lokalizacji elementów konstrukcyjnych, skanowanie 3D pozwala także na zarejestrowanie kształtu, rozmiaru oraz topografii uszkodzeń. Te szczegółowe

informacje są istotne do oceny ryzyka awarii lub katastrofy budowlanej podczas eksploatacji i konserwacji obiektów.

Ważnym aspektem skanowania 3D jest możliwość dokładnego odtworzenia detali konstrukcyjnych. Przedstawiono to na przykładzie słupa nośnego. Skanowanie 3D dostarcza precyzyjnych danych o geometrii modelu. Dzięki inżynierii odwrotnej możliwe jest przetworzenie tych danych w celu uzyskania wiernych kopii cyfrowych modeli, które można wykorzystać w obliczeniach numerycznych.

*Received: 23.09. 2024*  
*Revised: 07.10. 2024*  
*Published: 25.11.2024*

*Artykuł wpłynął do redakcji: 23.09. 2024 r.*  
*Otrzymano poprawiony po recenzjach: 07.10. 2024 r.*  
*Opublikowano: 25.11.2024 r.*

## Literature

- [1] Javaid M, Haleem A, Pratap R. Singh, Suman R. Industrial perspectives of 3D scanning: Features, roles and its analytical applications. *Sensors Int.* 2021. DOI: 10.1016/j. sintl. 2021.100114.
- [2] Marshall GF, Stutz GE. *Handbook of Optical and Laser Scanning*. Boca Raton: CRC Press. 2018. DOI: 10.1201/9781315218243.
- [3] Peansupap V, May AM. Development of a System for Measuring Surface Slope with Point Cloud Data in *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 369, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2024, pp. 507–516. DOI: 10.1007/978-981-99-4049-3\_40.
- [4] Tran HH, Vu HQ, Van Tran A. Application of FARO Focus 3D S350 Terrestrial Laser Scanner in Building 3D Models of Potential Areas of Landslides and Rocks – Case Study in Ha Giang Province, Vietnam, in *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024. DOI: 10.1007/978-981-99-2345-8\_72.
- [5] Flugge J, Wendt K, Danzebrink H, Abou-zeid A. Optical Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering, *CIRP Ann. – Manuf. Technol.* 2002; vol. 51, no. 2: 685 – 699.
- [6] Szilvási-Nagy M, Mátyási G. Analysis of STL Files, *Math. Comput. Model.* 2003. DOI: 10.1016/s0895-7177 (03) 90079-3.
- [7] Haleem A et al. Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: An overview. *Int. J. Cogn. Comput. Eng.* 2022. DOI: 10.1016/j. ijcce. 2022.08.003.
- [8] Urbas U, Hrga T, Povh J, Vukašinović N. Novel alignment method for optical 3D gear metrology of spur gears with a plain borehole. *Measurement*. 2022. DOI: 10.1016/j.measurement. 2022.110839.
- [9] Manuello Bertetto A, D’Angella P, Fronterre M. Residual strength evaluation of Notre Dame surviving masonry after the fire. *Eng. Fail. Anal.*, vol. 122, no. December 2020, p. 105183, 2021, DOI: 10.1016/j.engfailanal. 2020.105183.
- [10] ANSYS. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. ANSYS Inc. 2013; vol. Release 15, no. November, pp. 1–909.
- [11] Gierczak J. *Przebudowa konstrukcji stalowych. Część 2 – analiza stali*. Builder, no. Lipiec, 2016.
- [12] Yongyi Zhu P. Best Practices for Contact Modeling using ANSYS. ANSYS Inc. 2017, [Online]. Available: <https://pic.huodongjia.com/ganhuodocs/2017-09-15/1505456086.9.pdf>.