

mgr inż. Mateusz Uściłowski^{1*)}

ORCID: 0000-0002-3594-4445

mgr inż. Borys Kopeć¹⁾

ORCID: 0009-0009-2132-0306

prof. dr hab. inż. Marek Salamak¹⁾

ORCID: 0000-0003-3602-0575

mgr inż. Kamil Bednarz¹⁾

ORCID: 0009-0001-6574-6589

3D reconstruction and solid modeling in bridge inspection using virtual techniques

Rekonstrukcja 3D i modelowanie bryłowe w inspekcji obiektów mostowych z użyciem technik wirtualnych

DOI: 10.15199/33.2025.07.17

Abstract. The article presents the use of 3D reconstruction techniques in bridge infrastructure inspection, using the example of a viaduct pier. Models from photogrammetry, laser scanning, and their integration were compared. The integration of 3D models with condition data in a virtual environment and their inspection process are also described. The research confirms that 3D reconstruction enables precise measurements and inspections, supporting the diagnostics and maintenance of infrastructure.

Keywords: inspection; bridges; BIM; 3D reconstruction; reality capturing; photogrammetry; laser scanning.

Streszczenie. W artykule przedstawiono zastosowanie technik rekonstrukcji 3D w inspekcji infrastruktury mostowej na przykładzie filara wiaduktu. Porównano modele uzyskane na podstawie fotogrametrii, skanowania laserowego oraz ich integracji. Opisano także sposób integracji modeli 3D z danymi o stanie technicznym w środowisku wirtualnym oraz proces ich inspekcji. Badania potwierdzają, że rekonstrukcja 3D umożliwia prowadzenie precyzyjnych pomiarów i inspekcji, wspierając diagnostykę i utrzymanie infrastruktury.

Słowa kluczowe: inspekcja; mosty; BIM; rekonstrukcja 3D; przechwytywanie rzeczywistości; fotogrametria; skanowanie laserowe.

Currently, thousands of bridge inspections are conducted annually in Poland, with varying levels of detail. These inspections concern different types of structures – from small culverts to bridges with pylons tens of meters high. As a result, inspectors face diverse challenges, and traditional inspection methods do not always allow for effectively overcoming encountered difficulties and limitations. One of the main problems is the difficult access to certain structural elements, such as bearings, pylon heads, or spans located high above the ground or over water obstacles. Assessing the technical condition of these elements often involves significant risk to the health and even life of inspectors, and in many cases, conducting inspections using traditional methods is virtually impossible [1]. Another important issue is the lack of repeatability of results from subsequent inspections [2]. It is often the case that annual reviews are carried out by different inspectors, who may not have complete knowledge of the previous technical condition of the assessed structure. They have only the reports from earlier inspections, which represent the condition of the structure in a subjective and fragmented manner, after substantial processing of previously acquired information that was not preserved.

A potential solution to these issues is the application of modern digital technologies. Above all, they enable the repeatable acquisition of a wide range of input data

O bencie w Polsce przeprowadza się rocznie tysiące inspekcji obiektów mostowych o różnym stopniu szczegółowości. Dotyczą one różnych typów konstrukcji – od niewielkich przepustów rurowych po mosty z kilkudziesięciometrowymi pylonami. W związku z tym, inspektorzy stają przed różnymi wyzwaniami, a tradycyjne metody inspekcji nie zawsze pozwalają na skuteczne pokonanie napotykanych trudności i ograniczeń. Jednym z głównych problemów jest trudny dostęp do niektórych elementów konstrukcji, takich jak łożyska, głowice pylonów czy przęsła usytuowane wysoko nad terenem lub nad przeszkodami wodnymi. Przeprowadzenie oceny stanu technicznego tych elementów wiąże się często z dużym ryzykiem dla zdrowia, a nawet życia inspektorów, a w wielu przypadkach wykonanie inspekcji w tradycyjny sposób jest wręcz niemożliwe [1]. Innym istotnym problemem jest brak powtarzalności wyników kolejnych inspekcji [2]. Często zdarza się bowiem, że coroczne przeglądy wykonywane są przez innych inspektorów, którzy nie zawsze posiadają pełną wiedzę na temat wcześniejszego stanu technicznego ocenianego obiektu. Dysponują oni jedynie protokołami z poprzednich inspekcji, które przedstawiają stan obiektu w sposób subiektywny i fragmentaryczny po znacznym przetworzeniu pozyskanych wcześniej informacji, które nie zostają zarejestrowane.

Rozwiązaniem tych problemów może być zastosowanie współczesnych technologii cyfrowych. Pojawia się przede wszystkim możliwość powtarzalnego zbierania wielu danych wejściowych dotyczących stanu technicznego obiektu mosto-

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

^{*)} Correspondence address: mateusz.uscilowski@polsl.pl

concerning the technical condition of bridge structures [3]. Once such information is collected and digitally recorded, it can be easily archived, efficiently processed, and thoroughly analyzed and visualized [4], regardless of difficulties related to inspector access to certain structural elements, their size, or complexity.

This article presents an example of an inspection of a road viaduct pier exceeding ten meters in height, constructed in the 1980s and located along a major traffic artery of the Upper Silesian metropolis (photograph). A comprehensive approach is demonstrated, including: an integrated method of data acquisition using photogrammetry and laser scanning; evaluation of the impact of model simplification on their diagnostic usefulness; and implementation of the models in a virtual reality (VR) environment as a new stage of infrastructure inspection. The closest approach found in the literature is presented in [5], where a photogrammetric model was used with damage detection algorithms and basic VR inspection, but without integration with BIM models. Other authors often limit themselves to the use of single reconstruction techniques and do not include the implementation of results in the technical condition assessment process, such as in [6] or [7]. The aspect of analyzing the impact of data volume and optimizing models for use in VR environments is also commonly omitted [8].



Location of the viaduct and pier
Lokalizacja wiaduktu i filara

3D reconstruction of the pier

3D reconstruction is the process of creating a three-dimensional model of an object or terrain based on data collected using various measurement techniques or imaging methods [9]. It may involve either digitally reproducing an existing structure or generating new models based on measurement-derived information. This is a complex process that comprises several key stages illustrated in Figure 1. Such reconstruction can also be referred to as reality capture [8]. It is an example of reverse engineering, which relies on precise measurement followed by the reproduction of a specific object.

The first stage of this process involves selecting the reconstruction method, i.e., the approach to data acquisition in the field. It is important to identify hazards and limitations in the spatial context of the reconstructed object. The surro-

wego [3]. Mając tak zgromadzone i cyfrowo zapisane informacje, można je, po odpowiedniej obróbce, łatwo archiwizować, skutecznie przetwarzać oraz dokładnie analizować i wizualizować [4], bez względu na problemy związane z dostępem inspektora mostowego do określonych elementów konstrukcji, ich wielkością czy złożonością.

W artykule przedstawiono przykład inspekcji ponaddziesięciometrowego filara wiaduktu drogowego, wybudowanego w latach osiemdziesiątych XX wieku, znajdującego się w ciągu głównej arterii komunikacyjnej górnośląskiej metropolii (fotografia). Zaprezentowano kompleksowe podejście, które obejmuje: zintegrowaną metodę pozyskiwania danych z użyciem fotogrametrii i skanowania laserowego; ocenę wpływu uproszczenia modeli na ich przydatność diagnostyczną oraz wdrożenie modeli w środowisku wirtualnym (VR) jako nowego etapu inspekcji obiektów inżynierskich. Najbliższym podejściem w literaturze jest praca [5], w której wykorzystano model fotogrametryczny z algorytmami detekcji uszkodzeń i podstawową inspekcję w VR, ale bez integracji z modelami BIM. Inni autorzy często ograniczają się do zastosowania pojedynczych technik rekonstrukcji i nie uwzględniają etapu implementacji wyników w procesie oceny stanu technicznego, jak np. [6] czy [7]. Pomija się również aspekt analizy wpływu liczby danych i optymalizacji modeli pod kątem zastosowania w środowisku VR [8].

Rekonstrukcja 3D filara

Rekonstrukcja 3D to proces tworzenia trójwymiarowego modelu obiektu lub terenu na podstawie danych zebranych różnymi technikami pomiarowymi lub obrazowaniem [9]. Może obejmować zarówno cyfrowe odtwarzanie istniejącej struktury, jak i generowanie nowych modeli na podstawie informacji uzyskanych z pomiarów. Jest to złożony proces, na który składa się kilka kluczowych etapów pokazanych na rysunku 1. Rekonstrukcję taką można również nazwać przechwytywaniem rzeczywistości (ang. reality capture) [8]. Jest to przykład inżynierii odwrotnej, która bazuje na precyzyjnym pomiarze i późniejszym odwzorowaniu konkretnego obiektu.

Pierwszy etap tego procesu polega na wyborze metody rekonstrukcji, czyli pozyskiwania danych w terenie. Ważne jest zidentyfikowanie zagrożeń i ograniczeń w przestrzeni rekonstruowanego obiektu. Otoczenie oraz kształt obiektu bezpośrednio

undings and shape of the object directly influence the choice of tools. For bridge structures, the selection typically concerns the use of either photogrammetry or laser scanning techniques. This results

from the specific geometry and spatial extent of such structures. Regardless of the selected technique, the initial step should involve defining reference points [10], which facilitate spatial localization and integration of the collected measurement data. To obtain complete and useful data, the object and its surroundings should be analyzed for any obstacles that may affect the quality and effectiveness of the reconstruction. These include elements that may require very high accuracy in the generated point cloud (e.g., geometry variations, openwork elements, or entire areas in poor technical condition).

Processing in the 3D reconstruction workflow is complex and multistage. Based on input data, such as photographs and scans, a low-density point cloud, also referred to as a sparse cloud, is first generated. This serves as an initial estimate of the point positions in space, resulting from feature-matching algorithms and camera or scanner pose estimation. At this stage, it is possible to verify the mission assumptions and evaluate the required density of data acquisition. Subsequently, a dense point cloud is generated. The software calculates the exact position of all points in the cloud by fitting spatial structures. Connections are created between the points of the dense cloud in the form of a triangular mesh, which is then used to build the outer surface of the reconstructed object. This surface also serves as the basis for generating the object's texture, which provides visual information such as color and surface damage.

For the 3D reconstruction of the pier, complementary techniques of photogrammetry and laser scanning were used. Typically, **photogrammetry** is employed both for creating models of bridge structures for inspection purposes [11] and for archiving data of historical structures [7], while laser scanning is primarily applied in the geometric inventory of bridge structures [6]. A review of existing research shows growing interest in integrating photogrammetric and laser scanning data. In the national context, these issues have been discussed, among others, in the monograph [12] and publication [13]; however, they did not address the diagnostics of bridge structures, which is the focus of study [14], describing the use of integrated data for the geometric assessment of such structures.

Photogrammetry is an example of a passive method that, due to its universal capabilities and satisfactory measurement accuracy, is quite frequently used in construction. In this method, it is crucial that each subsequent image overlaps the previous one by 60 – 80%. An overlap below 60% would result in structural and geometric inaccuracies, and in extreme cases, in the complete failure of reconstruction. Additionally,

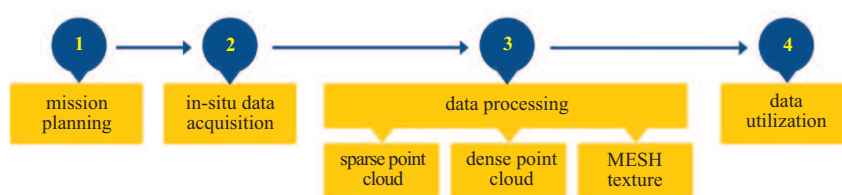


Fig. 1. 3D reconstruction process

Rys. 1. Proces rekonstrukcji 3D

wpływają na wybór narzędzi. W przypadku obiektów mostowych, wybór dotyczy najczęściej wykorzystania techniki fotogrametrii lub skano-

wania laserowego. Wynika to ze specyfiki geometrii tych konstrukcji oraz ich przestrzennej rozciągłości. Niezależnie od wybranej techniki, pierwszym krokiem powinno być wyznaczenie punktów referencyjnych [10], które ułatwią lokalizację przestrzenną i integrację gromadzonych danych pomiarowych. Chcąc uzyskać dane kompletne i użyteczne, należy przeanalizować obiekt wraz z terenem wokół niego pod kątem występowania utrudnień wpływających na jakość i skuteczność rekonstrukcji. Chodzi o fragmenty, które mogą wymagać bardzo dużej dokładności tworzonej chmury punktów (zmiany geometrii, elementy ażurowe czy całe obszary w złym stanie technicznym).

Przetwarzanie w procesie rekonstrukcji 3D jest złożone i wieloetapowe. Bazując na danych wejściowych, np. zdjęciach i skanach, najpierw generowana jest chmura punktów o małym zagęszczeniu, nazywana też chmurą rzadką. Stanowi ona wstępne oszacowanie pozycji punktów w przestrzeni, powstałych w wyniku działania algorytmów dopasowywania cech i estymacji położenia kamer lub skanera. Na tym etapie możliwa jest weryfikacja przyjętych założeń misji oraz ocena potrzebnej gęstości danych do pozyskania. Następnie generowana jest już właściwa, gęsta chmura punktów. Oprogramowanie oblicza dokładne położenie wszystkich punktów chmury przez dopasowanie struktur przestrzennych. Między punktami tej gęstej chmury tworzone są powiązania w postaci siatki trójkątów, z których budowana jest zewnętrzna powierzchnia rekonstruowanego obiektu. Ta powierzchnia jest też podstawą do generowania tekstury obiektu, czyli warstwy dostarczającej informacje wizualne o obiekcie (np. kolorystyka, powierzchniowe uszkodzenia).

Do rekonstrukcji 3D filara użyto wzajemnie uzupełniających się technik fotogrametrii i skanowania laserowego. Standardowo, **fotogrametria** wykorzystywana jest zarówno do tworzenia modeli obiektów mostowych w celach inspekcyjnych [11], jak i do archiwizowania danych o obiektach zabytkowych [7], natomiast skanowanie laserowe stosowane jest przede wszystkim w inwentaryzacji geometrycznej obiektów mostowych [6]. Przegląd dotychczasowych badań wykazuje coraz większe zainteresowanie integracją danych fotogrametrycznych i skanowania laserowego. W kontekście krajowym zagadnienia te były opisywane m.in. w monografii [12] i publikacji [13], ale nie dotyczyły one diagnostyki obiektów mostowych, którym poświęcona jest praca [14] opisująca zastosowanie zintegrowanych danych do oceny geometrycznej tych obiektów.

Fotogrametria jest przykładem pasywnej metody, która ze względu na swoje uniwersalne możliwości i zadowalającą dokładność pomiarów, jest dość często stosowana w budownictwie. W tej metodzie kluczowe jest, aby każde kolejne zdjęcie było przesunięte względem poprzedniego o 60 – 80%. Przesunięcie mniejsze niż 60% skutkowałoby niedokładno-

image files should contain geolocation coordinates. 3D model generation software uses this information to accurately identify key feature points used in model creation. Therefore, consecutive images should not be taken from the same position but always with a certain displacement of the detector (camera). The method utilizes object features (changes in color, texture, geometry), which makes it well suited for reconstructing objects with complex shapes and heterogeneous textures.

In the case of the second technique, **laser scanning**, a terrestrial laser scanner was used, which, when mounted on a sufficiently high tripod, proved adequate for reconstructing the pier under study. The acquired points form a point cloud projected onto the surface of the measured object. The device's initial calibration ensures that the resulting point sets are accurate and automatically scaled. 3D geometry measurements yield very good results when scanning surfaces that diffusely reflect light. The result of the measurement is a point cloud with coordinates (X, Y, Z), representing the surface geometry in areas illuminated by the laser source. This method can be further enhanced with color information for each point, recorded in RGB format, resulting in a coherent, colored point cloud ready for further processing.

Preparation for the mission and data acquisition. The preparatory work included, among others, the placement of control points (markers) on the surface of the object. In this case, twelve black-and-white square markers were used, arranged three on each side of the pier, with the central marker offset relative to the outer ones. These markers are high-contrast patterns that allow for detection from any camera angle and ensure precise geometric calibration of the object during photogrammetric model generation. The geodetic coordinates of the marker centers were determined using a total station. Before data acquisition began, potential hazards and limitations that could arise during the work were assessed. For photogrammetry, problems may occur when reconstructing elements that are in shadow, lack surface texture, or strongly reflect light, leading to errors in the identification of characteristic points. Laser scanning, on the other hand, requires direct visibility of the surface and proper positioning of scanning stations, which can be challenging in densely built-up or vegetated areas. No such limitations were identified, and they did not affect the course of the experiment. The required model accuracy was assumed to be in the range of 1–2 cm, which falls within the execution tolerances for reinforced concrete elements.

To generate a 3D model during the reconstruction process, data acquisition was divided into two phases. First, a photogrammetric survey was conducted using an unmanned aerial vehicle (UAV). Such UAVs are commonly used in diagnostics both for detailed inspections of local damage [15] and for capturing entire structures through aerial imaging [16]. During this mission, standard photogrammetric principles were followed, including appropriate image overlap and proper camera angles. The UAV used was

ściami strukturalnymi i geometrycznymi, a w skrajnych przypadkach całkowitym brakiem rekonstrukcji. Dodatkowo, pliki z fotografiami powinny zawierać współrzędne geolokalizacyjne. Programy generujące modele 3D korzystają z tych informacji w celu dokładnego rozpoznania punktów charakterystycznych wykorzystywanych do tworzenia modelu. W takiej sytuacji kolejne zdjęcia nie powinny być wykonywane w tym samym położeniu, ale zawsze z pewnym przesunięciem pozycji detektora (kamery). Metoda wykorzystuje punkty charakterystyczne obiektów (zmiany koloru, tekstury, geometrii), dlatego też będzie dobrze nadawać się do odtworzenia obiektów o złożonym kształcie i niejednorodnej teksturze.

W przypadku drugiej techniki, czyli **skanowania laserowego**, zastosowano naziemny skaner, który przy odpowiednio wysokim statywie okazał się wystarczający do rekonstrukcji omawianego filara. Otrzymane punkty tworzą chmurę punktów rzutowanych na powierzchnię mierzonego obiektu. Wstępna kalibracja urządzenia pozwala na to, że otrzymywane zbiory punktów są dokładne i automatycznie skalowane. Pomiary geometrii 3D dają bardzo dobre rezultaty w przypadku skanowania powierzchni rozpraszającej światło. Wynikiem pomiaru jest chmura punktów o współrzędnych (X, Y, Z), obrazująca współrzędne powierzchni w obszarach oświetlonych przez źródło laserowe. Metoda może być dodatkowo uzupełniona informacją o barwie punktów, zapisanej w formacie RGB, dzięki czemu otrzymujemy spójną kolorową chmurę gotową do dalszego przetwarzania.

Przygotowanie do badań oraz pozyskiwanie danych. W zakres prac przygotowawczych wchodziło m.in. rozmieszczenie punktów kontrolnych (znaczników) na powierzchni obiektu. W tym przypadku było dwanaście białych-czarnych kwadratów, rozmieszczonych po trzy z każdej strony filara, przy czym środkowy punkt był przesunięty względem zewnętrznych. Znaczniki to wzory o dużym kontraście, umożliwiające ich lokalizację z dowolnego położenia kamery oraz precyzyjną kalibrację geometrii obiektu podczas generowania modelu fotogrametrycznego. Współrzędne geodezyjne, wyznaczone na środku znaczników, zostały określone tachimetrem. Przed rozpoczęciem zbierania danych przeprowadzono rozpoznanie potencjalnych zagrożeń i ograniczeń mogących pojawić się w trakcie prac. W przypadku fotogrametrii, problemy mogą występować przy rekonstrukcji elementów znajdujących się w cieniu, pozbawionych faktury lub silnie odbijających światło, co prowadzi do błędów w lokalizacji punktów charakterystycznych. Skanowanie laserowe wymaga natomiast bezpośredniej widoczności powierzchni oraz odpowiedniego ustawienia stanowisk, co bywa utrudnione w terenie gęsto zabudowanym lub porośniętym roślinnością. Nie stwierdzono takich ograniczeń i nie wpłynęły one na przebieg eksperymentu. Założono wymaganą dokładność modelu na poziomie 1–2 cm, jako mieszczącą się w granicach błędów wykonawczych elementów żelbetowych.

W celu utworzenia modelu 3D w procesie rekonstrukcji, pozyskiwanie danych podzielono na dwie części. W pierwszej kolejności wykonano oblot fotogrametryczny za pomocą bezałogowego statku powietrznego (BSP). Takie statki znajdują zastosowanie w diagnostyce zarówno w przypadku precyzyjnych inspekcji lokalnych uszkodzeń [15], jak i oblotów całych obiektów z wykonywaniem zdjęć [16]. Podczas tej misji zachowywa-

a lightweight DJI Mini 2 drone, weighing less than 0.25 kg, equipped with a 1/2.3" CMOS sensor with a resolution of 12 megapixels, a lens with a field of view of approximately 83°, an aperture of $f/2.8$, and a focusing range from 1 m to infinity. The navigation system used was a combination of GPS, GLONASS, and GALILEO. This setup allows for a vertical positioning accuracy of up to 0.5 m and a horizontal accuracy of up to 1.5 m. The addition of a vision positioning system improves the precision to 0.1 m vertically and 0.3 m horizontally. During the planning of data acquisition, the use of a heavier drone, the DJI Matrice 350 (takeoff weight approx. 5 kg), was also considered. However, due to terrain constraints and the type of pier, it was decided to use the smaller, lighter device. In the case of bridge inspections, especially in urbanized areas, smaller drones are more suitable because they are easier to maneuver and navigate in densely built environments.

Images were captured using both a top-down and orbiting method. A total of 254 photos were taken, automatically at two-second intervals during a manual flight, along with one video. This resulted in 82% image overlap, which is at the high end of photogrammetry standards. For experimental purposes during the processing stage, the dataset was reduced by half, yielding a 64% overlap. As a result, valid 3D reconstruction models were still obtained – the photogrammetric model remained accurate, and the texture was clear. Models generated with a lower level of data overlap were not produced correctly. Since the objective of the study was to achieve the highest possible model quality, an image overlap of approximately 80% was ultimately adopted (Figure 2a).

The next stage involved scanning using a terrestrial Leica BLK360 laser scanner. This model is characterized by its compact size and a measurement range of 0.6–30 m. The laser beam is emitted at a rate of 680,000 points per second, achieving an accuracy of 4 mm at distances up to 10 m and 7 mm at 30 m. The device's vertical field of view is 300°, while in the horizontal plane, the scanner construction allows for a full 360° rotation. All data were collected from eight scanning positions. The scan was supplemented with high-resolution panoramic images. To avoid issues related to

no zasady fotogrametrii, takie jak odpowiednie pokrycie zdjęć i kąty ich wykonania. Wykorzystany BSP, to lekki dron DJI Mini 2 o masie mniejszej niż 0,25 kg, wyposażony w kamerę z matrycą 1/2,3" CMOS o rozdzielczości 12 Megapixeli oraz obiektyw z kątem widzenia ok. 83°, przysłoną $f/2,8$ i zasięgiem od 1 m do nieskończoności. Użyty system nawigowania, to połączenie GPS, GLONASS i GALILEO. Pozycjonowanie pozwala na osiągnięcie dokładności do 0,5 m w pionie oraz 1,5 m w poziomie. Uzupełnienie systemu w pozycjonowanie wizyjne zwiększa precyzję do poziomu 0,1 i 0,3 m w pionie i poziomie. Podczas planowania pozyskiwania danych rozważane było również wykorzystanie ciężkiego drona DJI Matrice 350 (masa startowa ok. 5 kg). Ze względu na uwarunkowania terenowe i typ filara zdecydowano się jednak na wykorzystanie lżejszego i mniejszego urządzenia. W przypadku mostów, a szczególnie pracy w zurbanizowanym terenie, lepiej sprawdza się małe urządzenie, które jest łatwiejsze w pilotowaniu i sprawniej porusza się w otoczeniu nasyconym budowlami.

Zdjęcia zarejestrowano metodą góra-dół oraz dookoła obiektu. Łącznie wykorzystano 254 zdjęcia, wykonywane automatycznie w interwale dwóch sekund podczas manualnego przelotu oraz jeden film. Dało to pokrycie na poziomie 82%, czyli w górnym zakresie zasad fotogrametrii. W celach eksperymentalnych na etapie przetwarzania, zredukowano liczbę danych o połowę, co dało pokrycie na poziomie 64%. W rezultacie otrzymano poprawne modele rekonstrukcji 3D, model fotogrametryczny był dokładny, a tekstura wyraźna. Modele poniżej tego poziomu pokrycia danych nie generowały się w prawidłowy sposób. Celem badań było jednak uzyskanie modelu jak najlepszej jakości, dlatego też podjęto decyzję o przyjęciu pokrycia fotografii na poziomie ok. 80% (rysunek 2a).

Kolejna część obejmowała skanowanie przy użyciu naziemnego skanera Leica BLK360. Ten model cechuje się kompaktowym rozmiarem oraz zasięgiem 0,6 – 30 m. Wiązka lasera wysyłana jest z prędkością 680 000 punktów na sekundę, osiągając dokładność na poziomie 4 mm w zakresie do 10 m i 7 mm przy 30 m. Zakres widoczności urządzenia w pionie to 300°, natomiast w płaszczyźnie poziomej konstrukcja skanera pozwala na pełen obrót 360°. Wszystkie dane pozyskano na podstawie pomiarów z ośmiu stanowisk skanera. Skan uzupełniono panoramicznymi zdjęciami o dużej rozdzielczo-

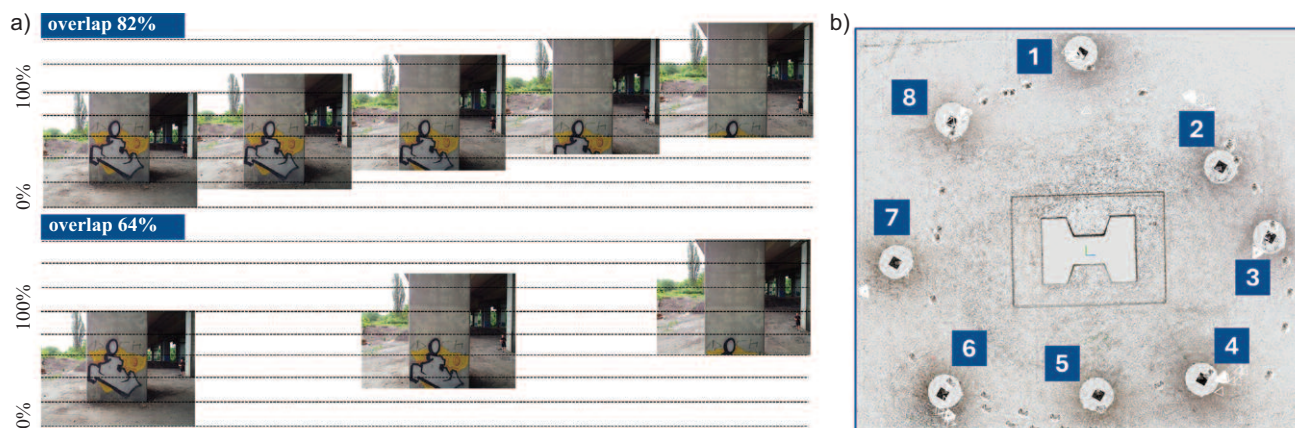


Fig. 2. Image overlap analysis (a) and scanner position layout (b)

Rys. 2. Analiza pokrycia fotografii (a) oraz rozmieszczenie stanowisk skanera (b)

missing data required for reconstruction, special attention was given to hard-to-reach areas such as recesses in the cross-section of the pier and the cap at the top of the structure. The scanner positions are illustrated in Figure 2b. Each section of the pier cross-section is visible from at least two scanning stations. As a result, the point clouds from individual stations are strongly interconnected, forming a cohesive whole, and every surface of the object has been uniformly reconstructed. Capturing the UAV photographs used for the photogrammetric model took 15 minutes, while terrestrial laser scanning took 35 minutes. Thus, approximately 4 minutes were allocated per scanning position. The scanning time at a single position is closely related to the scanner's parameters and its initial configuration.

Data processing and utilization. The recorded measurement data were processed using the Reality Capture software, which enables distance and volume measurements, component merging, texture optimization, and automatic reference point detection. Two datasets (from photogrammetry and laser scanning) were used to create three models: **1) a photogrammetric model, 2) a laser scanning-based model, and 3) a hybrid model integrating both techniques.** Generating the photogrammetric model using the software took 46 minutes. This time does not include the manual assignment of control point coordinates or model optimization. The laser scan data required approximately 20 minutes of preparation for processing, including the optimization of links between scan positions and the export of files into compatible formats. A total of 20 strong links were established between scan stations, achieving 62% overlap, which is sufficient to ensure stable and consistent registration. The average registration error for data packages was 0.006 m, indicating high consistency between individual point clouds.

The reconstruction process began with the generation of a sparse (preliminary) point cloud. In the case of laser scanning, this cloud was obtained directly from the device's software. For photogrammetry, the images were automatically aligned to each other, forming a point cloud that served as the basis for the reconstruction. The average reprojection error for the photogrammetric model was 0.5650 pixels. The geodetic coordinates assigned to control points during the preparation phase were then added. Based on the collected data, a mesh model composed of interconnected triangles was created, which was then supplemented with texture data. These types of models are most often exported to the open graphic format obj. From such processed models, it is possible to generate a point cloud in the e57 format, which serves as a basis for creating solid models. These, when supplemented with specific features such as reinforcement or non-graphical material data, can constitute BIM models and be exported to various formats, including ifc and fbx. Most of the mentioned file formats are so-called open formats, enabling easy data exchange and processing between different tools and platforms. The generated model types are shown in Figure 3.

ści. W celu uniknięcia problemów związanych z brakiem danych niezbędnych do rekonstrukcji, szczególną uwagę zwrócono na trudno dostępne obszary, takie jak zagłębienia przekroju filara i oczep w górnej części obiektu. Lokalizację stanowisk skanera przedstawiono na rysunku 2b. Każdy fragment przekroju filara jest widoczny z co najmniej dwóch stanowisk skanowania. Dzięki temu, chmury punktów z poszczególnych stanowisk mają silne powiązanie między sobą i tworzą spójną całość, a każda powierzchnia obiektu została jednolicie odtworzona. Wykonanie zdjęć za pomocą BSP, które zostały użyte do modelu fotogrametrycznego, trwało 15 min, a skanowanie laserowe w terenie 35 min. Na każde stanowisko skanowania przypadało więc ok. 4 min. Czas skanowania z pojedynczego stanowiska jest ściśle związany z parametrami i możliwościami skanera oraz jego wstępną konfiguracją.

Przetwarzanie i wykorzystanie danych. Zarejestrowane wyniki pomiarów zostały przetworzone w programie Reality Capture, który pozwala m.in. na pomiar odległości i objętości oraz łączenia komponentów i optymalizację tekstury, a także automatyczne wykrywanie punktów referencyjnych. W badaniu wykorzystano dwa zestawy danych (z fotogrametrii i skanowania) do utworzenia **trzech modeli: 1) fotogrametrycznego; 2) bazującego na skanowaniu laserowym; 3) powstałego na bazie integracji obu technik.** Generowanie modelu fotogrametrycznego przez oprogramowanie zajęło 46 min. Czas potrzebny na wskazywanie współrzędnych punktów kontrolnych czy optymalizacja modelu nie wchodzi w podany zakres. Skany laserowe wymagały przygotowania do obróbki, które trwało ok. 20 min, a w zakresie przygotowania chmury punktów wchodzi optymalizacja połączeń między poszczególnymi stanowiskami oraz eksport plików do kompatybilnych formatów. Między stanowiskami uzyskano 20 silnych połączeń, osiągając 62% pokrycia, co jest wartością wystarczającą do uzyskania stabilnej i spójnej rejestracji. Średni błąd rejestracji pakietów danych wynosił 0,006 m, co świadczy o dużej zgodności między poszczególnymi chmurami punktów.

Proces rekonstrukcji rozpoczął się od wygenerowania rzadkiej (wstępnej) chmury punktów. W przypadku skanowania laserowego chmurę uzyskano bezpośrednio z oprogramowania urządzenia. Natomiast w przypadku fotogrametrii zdjęcia zostały automatycznie dopasowane do siebie, tworząc chmurę punktów będącą bazą do rekonstrukcji. Średni błąd reprojektacji zdjęć modelu fotogrametrycznego wynosił 0,5650 piksel. Wyznaczonym na etapie przygotowania punktom kontrolnym przypisano następnie współrzędne geodezyjne. Na podstawie zebranych danych utworzono model siatkowy, czyli składający się z połączonej siatki trójkątów, który następnie został uzupełniony o dane teksturalne. Modele tego typu są najczęściej eksportowane do otwartego formatu graficznego .obj. Z tak opracowanych modeli możliwe jest wygenerowanie chmur punktów w formacie e57, stanowiącej bazę do tworzenia modeli bryłowych. Te z kolei, uzupełnione o specyficzne szczegóły, takie jak np. zbrojenie czy niegraficzne dane materiałowe, mogą stanowić modele BIM i być eksportowane do wielu formatów, m.in. .ifc czy .fbx. Większość wymienionych formatów plików to tzw. formaty otwarte, umożliwiające łatwą wymianę i przetwarzanie danych pomiędzy różnymi narzędziami i platformami. Utworzone typy modeli pokazano na rysunku 3.

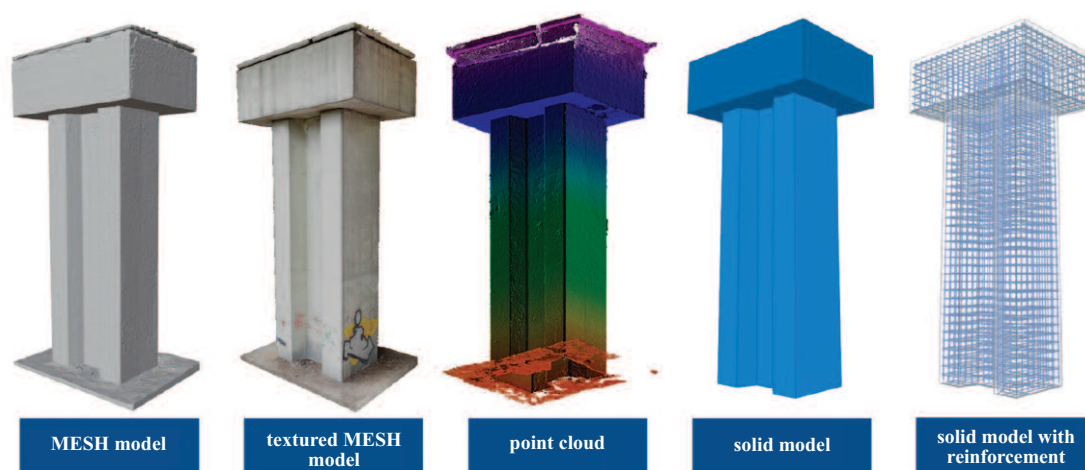


Fig. 3. Types of generated models

Rys. 3. Typy uzyskanych modeli

Results of the conducted study

Comparison of techniques in terms of quality and efficiency. The presented model of the pier was evaluated primarily in terms of two key aspects of reproduction quality – geometry and visual surface fidelity (texture). Regarding geometric quality, the assessment focused on the accuracy of the shape and dimensions of the structure as well as potential surface imperfections. Models obtained from laser scanning are characterized by very high precision in reproducing the object's surface, which appears smooth and closely reflects the actual geometry. Additionally, compared to the photogrammetric model, the edges are sharper and better defined. Photogrammetric models, on the other hand, although they present correct global geometry, show more local imperfections. The surface may be non-uniform, and edges are less distinct (Figure 4).

In contrast, when assessing visual quality, the results are reversed. Photogrammetric models exhibit significantly better texture quality, as they are generated from high-resolution photographs. All surface details – such as graffiti, cracks, or dirt – are well represented and clearly visible. In the case of laser scanning, color information is derived from spherical photographs taken during the measurement process. This is sufficient to capture the basic coloration of the measured points; however, the resulting texture quality is significantly lower than in the case of photogrammetry (Figure 5).

Rezultaty przeprowadzonych badań

Porównanie technik pod kątem jakości i efektywności. Przedstawiony model filara oceniany był przede wszystkim pod kątem dwóch kluczowych aspektów jakości odwzorowania – geometrii oraz wizualnej wierności powierzchni (tekstury). W kontekście jakości geometrycznej analizowano dokładność odwzorowania kształtu i wymiarów bryły oraz potencjalnych niedoskonałości powierzchni. Modele uzyskane na bazie skanowania laserowego charakteryzują się bardzo dużą precyzją odwzorowania powierzchni obiektu, która jest gładka i wyraźnie zbliżona do rzeczywistej geometrii obiektu. Ponadto, w porównaniu z modelem fotogrametrycznym, krawędzie są bardziej wyraźne i lepiej wygładzone. Z kolei modele fotogrametryczne, mimo prawidłowej globalnej geometrii, wykazują więcej niedoskonałości lokalnych. Powierzchnia może być niejednorodna, a krawędzie mniej wyraźne (rysunek 4).

W przypadku oceny jakości wizualnej wyniki są odwrotne. Modele fotogrametryczne cechują się znacznie lepszą jakością odwzorowywanych tekstur, które uzyskiwane są z fotografii wykonanych w wysokiej rozdzielczości. Wszystkie detale powierzchni, takie jak graffiti, spękania czy zabrudzenia, są dobrze odwzorowane i wyraźne. W przypadku skanowania laserowego, informacje o kolorze uzyskiwane są z fotografii sferycznych, wykonywanych podczas pomiaru. Wystarcza to do zarejestrowania podstawowej kolorystyki mierzonych punktów, natomiast jakość tekstury, uzyskana na tej podstawie, jest znacznie gorsza niż w przypadku fotogrametrii (rysunek 5).

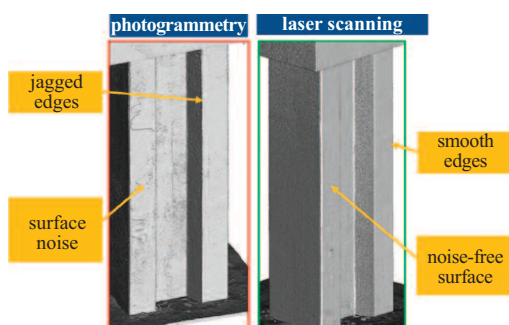


Fig. 4. Comparison of geometric quality of models obtained using different techniques

Rys. 4. Porównanie jakości geometrycznej modeli pozyskanych różnymi technikami

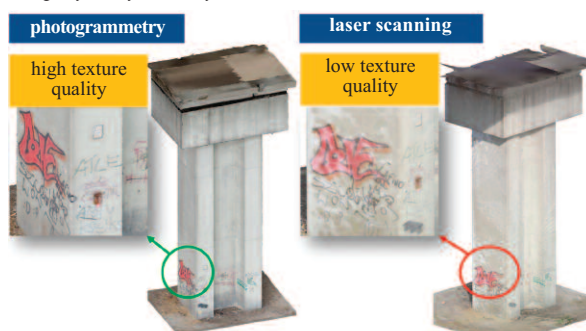


Fig. 5. Comparison of texture quality of models obtained using different techniques

Rys. 5. Porównanie jakości teksturalnej modeli pozyskanych różnymi technikami

To achieve a model of very high geometric and visual quality, a hybrid solution integrating both techniques can be applied. These methods can therefore complement each other, eliminating specific deficiencies and uncertainties related to surface, geometry, and texture (Figure 6). It should be noted that the presented conclusions apply to a specific case. In practice, photographs acquired using a UAV-mounted camera often constitute the only feasible supplement to the model's geometry. In such cases, photogrammetry serves not only to enhance the model's texture but is also essential for reconstructing its geometric dimensions.

During the study, not only complete data sets were combined, but also multiple configurations with incomplete data were tested. Models were created using partial data from both photogrammetry and scanning when necessary. Data reduction involved the intentional removal of sets, such as photos or point clouds from one side of the pier, to examine the possibility of the techniques compensating for each other. Both methods proved effective throughout the 3D reconstruction process of bridge structures. The conducted analyses indicate that combining data from both techniques allows for mutual compensation of limitations. Laser scanning ensures precise reproduction of geometry, especially in shaded areas, while photogrammetry provides high-quality texture information. In the analyzed cases with reduced data, e.g., an entire wall missing, the alternative technique's data filled in the geometric gaps.

Although acquiring all available data from both techniques increases the likelihood of obtaining a complete model, excessive data collection does not always proportionally improve the final model's quality and may significantly extend processing time and complicate the workflow. For this reason, selecting the appropriate technique and planning the data acquisition process for a given task becomes crucial in achieving an optimal balance between reconstruction quality and process efficiency.

Analysis of the geometric and visual accuracy of 3D models. As part of the study, control measurements of selected dimensions of the pier's cross-section, shown in Figure 7, were conducted. These measurements were taken using a measuring tape and a total station. The same elements were then measured on the models created based on photogrammetry, laser

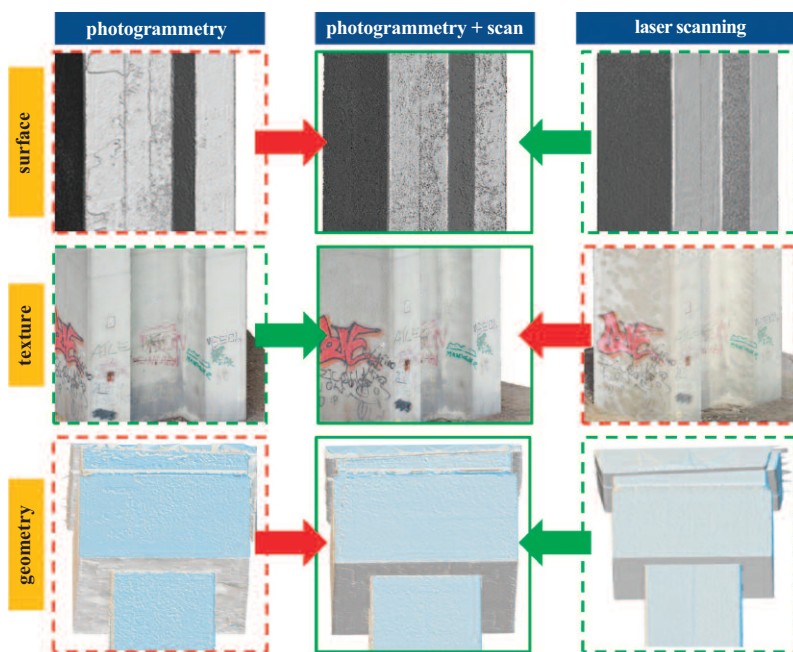


Fig. 6. Comparison of texture quality of models obtained using different techniques
Rys. 6. Cechy modeli uzyskanych na bazie fotogrametrii i skanowania laserowego

W celu uzyskania modelu o bardzo dobrej jakości zarówno geometrycznej, jak i wizualnej, można zastosować rozwiązanie hybrydowe, które integruje obie techniki. Metody mogą się więc wzajemnie uzupełniać, eliminując specyficzne braki i niepewności dotyczące powierzchni, geometrii oraz tekstury (rysunek 6). Trzeba mieć na uwadze, że przedstawione wnioski dotyczą konkretnego przypadku. W praktyce, fotografie pozyskiwane kamerą zamontowaną na BSP często stanowią jedynie możliwe uzupeł-

nienie geometrii modelu. W takich sytuacjach fotogrametria służy nie tylko do uzupełnienia tekstury modelu, lecz także jest niezbędna do odtworzenia jego wymiarów geometrycznych.

Podczas badań łączone były nie tylko pełne zakresy danych, ale przeprowadzono także wiele możliwych konfiguracji z niekompletnymi danymi. Modele tworzone na bazie częściowych danych zarówno z fotogrametrii, jak i skanu, gdy było to potrzebne. Wybrakowywanie danych polegało na celowym usuwaniu zestawów, np. zdjęć lub chmury punktów wybranej strony filara, w celu sprawdzenia możliwości uzupełniania się technik rekonstrukcji 3D. Obie okazały się efektywnym sposobem w całym procesie rekonstrukcji 3D obiektów mostowych. Przeprowadzone analizy wskazują, że łączenie danych z obu technik pozwala na wzajemną niwelację ograniczeń. Skanowanie laserowe zapewnia precyzyjne odwzorowanie geometrii, szczególnie w miejscach zacienionych, podczas gdy fotogrametria dostarcza informacji o teksturze bardzo dobrej jakości. W analizowanych przypadkach z wybrakowywaniem danych, np. jednej całej ściany, dane z alternatywnej techniki uzupełniły ciągłość geometrii.

Pozyskanie wszystkich dostępnych danych z obu technik zwiększa wprawdzie prawdopodobieństwo uzyskania kompletnego modelu, to jednak nadmiarowe gromadzenie informacji nie zawsze przekłada się proporcjonalnie na zwiększenie jakości modelu końcowego, a może znacznie wydłużyć czas obróbki i utrudnić proces ich przetwarzania. Z tego względu kluczowy staje się dobór techniki oraz plan pozyskiwania danych do konkretnego zadania, aby uzyskać optymalny balans między jakością rekonstrukcji a efektywnością procesu.

Analiza dokładności geometrycznej i wizualnej modeli 3D. W ramach badań dokonano pomiarów kontrolnych wybranych wymiarów przekroju poprzecznego filara pokazanego na rysunku 7. Pomiary wykonano przy użyciu taśmy mierniczej oraz tachimetru. Następnie te same elementy zmierzono na modelach utworzonych na podstawie fotogrametrii, ska-

scanning, and their hybrid combination. The results were compiled in a table. The discrepancies were minor, with the average relative error amounting to approximately 0.55%. Based on the obtained results, it was concluded that the models exhibit high geometric accuracy. The differences between the 3D model dimensions and the actual values were small and fell within the limits of measurement error and possible construction inaccuracies of the pier (1–2 cm). The result was considered satisfactory and met the initial assumptions. Therefore, it can be concluded that high-quality models obtained through 3D re-construction are suitable for performing precise measurements.

Evaluating the texture accuracy in 3D reconstruction models presents a significant challenge due to the lack of objective measurement criteria for these parameters. Unlike geometric data, visual aspects are not proportionally measurable, and their accuracy is difficult to express using numerical indicators. Despite the absence of clear standards, several auxiliary and more quantifiable

evaluation criteria can be applied. These include, for example, texel density [17], which defines the area of the actual model surface per one texture pixel; the resolution of the used textures; the percentage of the model surface covered by high-quality texture; and the uniformity of lighting during image acquisition. In engineering practice, subjective evaluation still plays a key role, including the readability of details that are significant from a diagnostic point of view. However, it should be emphasized that although image resolution in photogrammetry plays an important role in accurately reflecting surface details, increasing resolution does not always lead to a proportional improvement in the final texture quality. During the analyses, an experimental data acquisition was conducted using reduced photo resolution by approximately 50%. Initially, the resolution was 4000×3000 pixels, corresponding to high-resolution 4K images, and was then reduced to 2730×1536 pixels, which corresponds to a resolution of just 2.7K. The results clearly showed a significant reduction in model processing time with almost unchanged visual quality. The details remained legible, colors vivid, and dirt and graffiti clearly visible.

In the case of the analyzed structure, no significant loss in the usefulness of visual data was observed, suggesting that, under certain conditions, parameter optimization (including resolution reduction) is possible without compromising the texture quality required for inspection purposes. However,

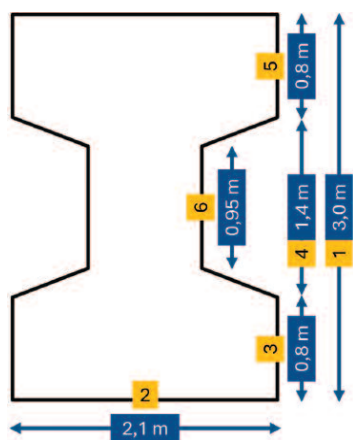


Fig. 7. Pier geometry measured directly in the field

Rys. 7. Geometria filara pomierzona bezpośrednio w terenie

Pier geometry measurements on models obtained using various techniques
Pomiary geometrii filara na modelach uzyskanych z poszczególnych technik

Segment (per Fig. 7)/Odcinek wg rysunku 7	Reference measurement/Pomiar kontrolny	Photogrammetry/Fotogrametria [m]	Laser scanning/Skanowanie laserowe	Photogrammetry + laser scanning/Fotogrametria + skanowanie
1	3,000	2,988	3,001	2,984
2	2,100	2,100	2,089	2,091
3	0,800	0,792	0,793	0,786
4	1,400	1,385	1,402	1,390
5	0,800	0,785	0,792	0,791
6	0,950	0,964	0,954	0,951

nowania laserowego oraz ich hybrydowego połączenia. Wyniki zestawiono w tabeli. Rozbieżności są niewielkie, a średni błąd względny wynosi ok. 0,55%. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że modele charakteryzują się dużą dokładnością geometryczną. Różnice wymiarów modeli 3D względem rzeczywistych wartości są niewielkie i mieszczą się w granicach błędów pomiarowych oraz ewentualnych niedokładności wykonawczych filara (1–2 cm). Wynik uznano za zadowalający i spełniający wstępne założenia. Można zatem uznać, że dobrej jakości modele, uzyskane w procesie rekonstrukcji 3D, nadają się do wykonywania precyzyjnych pomiarów.

Ocena dokładności odwzorowania tekstury w modelach rekonstrukcji 3D stanowi istotne

wyzwanie, wynikające z braku obiektywnych kryteriów pomiarowych dotyczących tych parametrów. W przeciwieństwie do danych geometrycznych, aspekty wizualne nie są proporcjonalnie mierzalne, a ich dokładność ciężko jednoznacznie wyrazić za pomocą wskaźników liczbowych. Pomimo braku jednoznacznych standardów, możliwe jest zastosowanie

kilku pomocniczych, bardziej wymiernych kryteriów oceny. Należą do nich m.in. gęstość texela [17], czyli wielkość rzeczywistej powierzchni modelu przypadająca na jeden piksel tekstury, rozdzielczość używanych tekstur, procentowe pokrycie powierzchni modelu teksturą bardzo dobrej jakości oraz jednorodność oświetlenia podczas akwizycji zdjęć. W praktyce inżynierskiej kluczową rolę nadal odgrywa ocena subiektywna, obejmująca np. czytelność detali istotnych z diagnostycznego punktu widzenia. Należy jednak podkreślić, że choć rozdzielczość zdjęć w fotogrametrii odgrywa ważną rolę w dokładnym odwzorowaniu szczegółów powierzchni, to jej zwiększanie nie zawsze przekłada się na proporcjonalną poprawę jakości końcowej tekstury. Podczas analiz przeprowadzono eksperymentalne pozyskanie danych z obniżoną rozdzielczością fotografii o ok. 50%. Było to 4000×3000 pikseli, co odpowiada obrazom wysokiej rozdzielczości 4K, a następnie zredukowano wielkość matrycy do 2730×1536 pikseli, czyli o rozdzielczości tylko 2,7K. Rezultaty jednoznacznie wykazują znaczne skrócenie czasu procesowania modelu, przy niemal niezmięnionej jakości wizualnej. Szczegóły w dalszym ciągu są czytelne, kolory żywe, a zabrudzenia i graffiti wyraźne.

W przypadku analizowanego obiektu nie zaobserwowano istotnych strat w przydatności danych wizualnych, co sugeruje, że w określonych sytuacjach optymalizacja parametrów (w tym zmniejszenie rozdzielczości) jest możliwa bez utraty jakości tekstury wymaganej do celów inspekcyjnych. Naszym zdaniem na-

in our opinion, the analytical needs should be considered on a case-by-case basis, as high image resolution will certainly be advisable for objects with a large number of minor defects.

Integration of the BIM model with technical condition data. BIM models can be integrated with technical condition data in various ways. The simplest method involves attaching reports containing information about the technical condition. A more advanced approach is mapping a vectorized image of the damage directly onto the solid model [18]. This allows for visualization in a three-dimensional space while maintaining both geometric and logical links between the virtual damage model and the element on which the damage was identified.

In the presented case, an approach was applied that combines a solid model in fbx format with a photogrammetric model in obj format. The analysis was based on the models described earlier in the article. Due to limitations of commercially available tools that enable navigation in virtual reality (VR), it was decided to develop a proprietary application. Using the Unity engine, a popular platform for creating VR applications and video games, a dedicated virtual environment was created, where calibrated and integrated models were placed. The developed VR environment, built in Unity, is currently at an early stage and has not yet undergone formal user testing. The applied solutions are demonstrative and part of an ongoing design process. By adjusting the transparency settings of individual layers, simultaneous viewing becomes possible, allowing, among other things, for precise localization of the reinforcement within the pier in relation to its visible actual surface and identified damage (Figure 8). Due to the lack of access to archival documentation, the reinforcement was modeled based on standard requirements and general engineering knowledge, and the presented reinforcement is a simulation of its expected configuration. This approach provides inspectors with new opportunities for technical condition analysis in a virtual environment [19]. Most importantly, it allows for the safe assessment of hard-to-reach elements without the need for specialized equipment such as lifts, scaffolding, or climbing gear. Thanks to 3D reconstruction, it is possible to virtually approach the inspected surfaces in a way that would often be impossible or involve considerable risk if performed on the real structure. At the same time, the user is not limited by time or weather conditions. One limitation of VR is the lack of validation for the accuracy of measurements taken by the user within the virtual environment. Although

leży jednak każdorazowo rozważyć potrzeby analizy, gdyż w przypadku obiektów o dużej liczbie drobnych uszkodzeń wysoka rozdzielczość zdjęć będzie z pewnością wskazana.

Integracja modelu BIM z danymi o stanie technicznym. Modele BIM mogą być integrowane z danymi o stanie technicznym na różne sposoby. Najprostszą metodą jest dołączanie raportów zawierających informacje o stanie technicznym. Bardziej zaawansowanym podejściem jest mapowanie zwektoryzowanego obrazu uszkodzenia bezpośrednio na modelu bryłowym [18]. Umożliwia to ich wizualizację w przestrzeni trójwymiarowej wraz z zachowaniem geometrycznego i logicznego powiązania pomiędzy wirtualnym modelem uszkodzenia a modelem elementu, na którym to uszkodzenie zostało stwierdzone.

W przedstawionym przypadku zastosowano podejście łączące model bryłowy w formacie .fbx z modelem fotogrametrycznym w formacie .obj. Do analizy przyjęto modele opisane wcześniej w artykule. Ze względu na ograniczenie dostępnych na rynku narzędzi pozwalających na poruszanie się w wirtualnej rzeczywistości (VR), zdecydowano się na stworzenie własnej aplikacji. Wykorzystując silnik Unity, popularne oprogramowanie do tworzenia aplikacji wirtualnej rzeczywistości oraz gier komputerowych, utworzono specjalne środowisko wirtualne, w którym umiejscowiono skalibrowane i zintegrowane modele. Opracowywane środowisko VR, tworzone w silniku Unity, znajduje się obecnie na wczesnym etapie i nie przeszło jeszcze formalnych testów użytkowników końcowych. Zastosowane rozwiązania mają charakter demonstracyjny i są elementem postępującego procesu projektowego. Zmieniając ustawienia przezroczystości poszczególnych warstw, możliwe jest ich jednoczesne przeglądanie, co pozwala m.in. na precyzyjne lokalizowanie zbrojenia filara względem jego widocznej rzeczywistej powierzchni wraz ze stwierdzonymi uszkodzeniami (rysunek 8). Ze względu na brak dostępu do dokumentacji archiwalnej, zbrojenie zostało odwzorowane na podstawie warunków normowych i ogólnej wiedzy inżynierskiej, a przedstawione zbrojenie jest symulacją jego występowania. Podejście to daje inspektorom nowe możliwości analizy stanu technicznego w środowisku wirtualnym [19], a przede wszystkim pozwala bezpiecznie ocenić elementy trudno dostępne bez specjalistycznego sprzętu, takiego jak podnośniki,

rusztowania czy oprzyrządowanie alpinistyczne. Dzięki rekonstrukcji 3D możliwe jest wirtualne zbliżenie się do ocenianych powierzchni w sposób, który często byłby niemożliwy w przypadku realnego obiektu lub obarczony znacznym ryzykiem. Jednocześnie użytkownik nie jest ograniczony czasowo ani przez warunki pogodowe. W przypadku VR ograniczeniem jest brak walidacji dokładności pomiarów wykonywanych przez użytkownika w środowisku wirtualnym. Pomiar

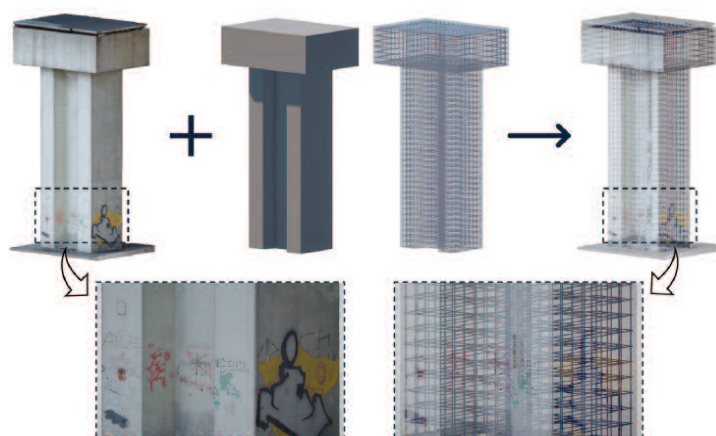


Fig. 8. Integration of solid and photogrammetric models of the pier in Unity
Rys. 8. Integracja modelu bryłowego oraz fotogrametrycznego filara w Unity

measurements are based on precise data, the interaction method may introduce errors related to control and VR headset resolution. It is also worth noting that this technology is not yet commonly used by engineers.

It is important to emphasize that conducting inspections using VR headsets creates a sensation of near-real presence at the structure. Navigation in the virtual environment becomes more intuitive, and the user can issue verbal commands or gesture to move to a selected location. This is made possible by advanced communication interfaces incorporating elements of artificial intelligence that can recognize speech, gestures, and human motion. Additionally, it is possible to perform measurements with virtual instruments and place annotations and voice notes in locations where irregularities are identified (Figure 9).

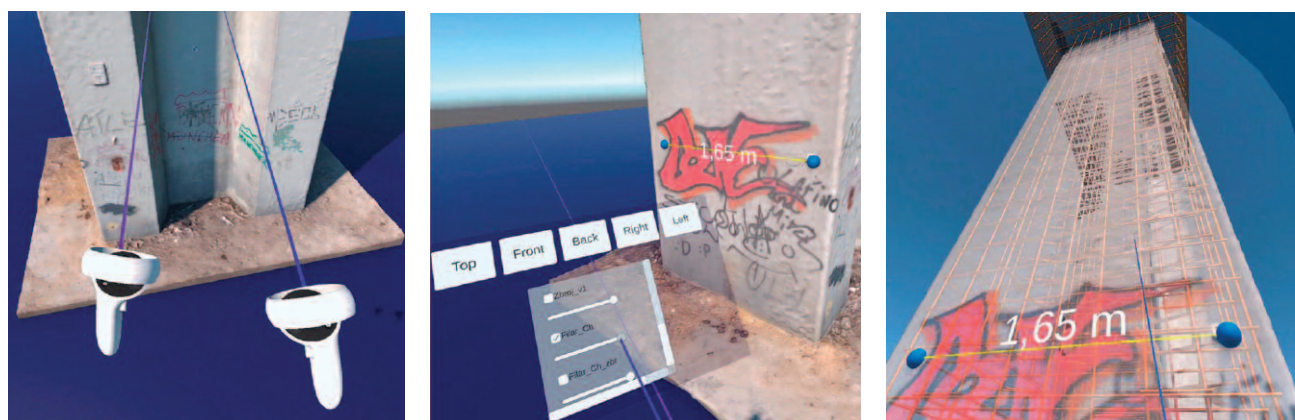


Fig. 9. Pier inspection in the VR environment developed in Unity
Rys. 9. Inspekcja filara w środowisku VR stworzonym w Unity

VR technology is evolving rapidly, and modern devices such as the Meta Quest 3 headset used in this study offer increasingly higher resolution and smoother image rendering. This significantly improves the effectiveness and comfort of inspections in the virtual environment. However, it should be noted that some simplifications of 3D models are introduced to accommodate the requirements of VR. This may include, for example, a reduction in the resolution of textures relative to the original photographs. The goal is to ensure smooth operation within the VR environment and reduce hardware requirements. In the context of bridge inspections, such a reduction in quality may be acceptable only for basic technical assessments, such as identifying large defects, cracks, corrosion, or deformations. In such cases, the displayed model quality is sufficient. More detailed reviews or measurements should be performed on full-resolution models using high-resolution monitors or projectors. For the analyzed model, a simplification was applied by reducing the mesh density from 9.9 million triangles to 5.0 million. Optimizing the mesh density reduced the file size from 245 MB to 120 MB. This simplification did not affect the intended geometric accuracy of the model (1 – 2 cm) or the texture quality due to the unchanged texel size.

In the developed method, the inspection process covers the entire procedural cycle, starting from 3D reconstruction, including data acquisition (photogrammetry and laser

bazującą wprowadzanie na danych precyzyjnych, to jednak sposób interakcji może generować błędy zależne od sterowania i rozdzielczości gogli VR. Warto również zauważyć, że technologia ta nie jest jeszcze powszechnie stosowana przez inżynierów.

Należy podkreślić, że wykonywanie inspekcji z wykorzystaniem gogli VR, stważy użytkownikowi wrażenie bliskiej rzeczywistości obecności przy obiekcie. Poruszanie się w wirtualnym środowisku staje się bardziej intuicyjne, a użytkownik może wydawać słowne komendy lub gestykulować, aby przenieść się w wybrane miejsce. Mają tu bowiem zastosowanie zaawansowane interfejsy komunikacji z elementami sztucznej inteligencji, która potrafi rozpoznawać mowę, gesty i ruch człowieka. Dodatkowo, możliwe jest wykonywanie pomiarów wirtualnymi przyrządami oraz umieszczanie oznaczeń i notatek głosowych w miejscach ze stwierdzonymi nieprawidłowościami (rysunek 9).

Technologia VR rozwija się dynamicznie i współczesne urządzenia, takie jak wykorzystywane w tym przypadku gogle Meta Quest 3, zapewniają coraz większą rozdzielczość i płynność obrazu. Znacznie poprawia to skuteczność i komfort inspekcji w środowisku wirtualnym. Należy jednak zauważyć, że na potrzeby VR wprowadza się pewne uproszczenia modeli 3D. Może to dotyczyć np. redukcji rozdzielczości tekstur względem oryginalnych fotografii. Ma to na celu zapewnienie płynnego działania w środowisku VR i ograniczenie wymagań sprzętowych. W kontekście inspekcji obiektów mostowych taka redukcja jakości może być akceptowalna jedynie w przypadku podstawowej oceny technicznej, np. identyfikacji dużych uszkodzeń, pęknięć, korozji czy deformacji. Jakość wyświetlanego modelu będzie wówczas wystarczająca. Bardziej szczegółowe oględziny czy pomiary należy wykonywać na pełnych modelach z wykorzystaniem wysokiej rozdzielczości monitorów lub projektorów. W przypadku analizowanego modelu zastosowano uproszczenie, polegające na rozrzedzeniu siatki trójkątów z zawierającej 9,9 mln trójkątów do 5,0 mln. Zoptymalizowanie gęstości siatki zredukowało rozmiar pliku z 245 MB do 120 MB. Takie uproszczenie nie wpłynęło na założoną dokładność geometryczną modelu (1 – 2 cm) oraz jakość tekstury ze względu na niezmienną wielkość texela.

W opracowywanej metodzie proces inspekcji obejmuje pełny cykl postępowania, począwszy od rekonstrukcji 3D obejmującej pozyskanie danych (fotogrametria, skanowanie laserowe)

scanning), processing and integration, to the creation of a solid model with the registration of technical condition information directly in the virtual environment. The inspector, operating in the VR environment or on a large display, can assess the structure, mark irregularities, and then generate a digital inspection report. A diagram of the entire workflow is presented in Figure 10.

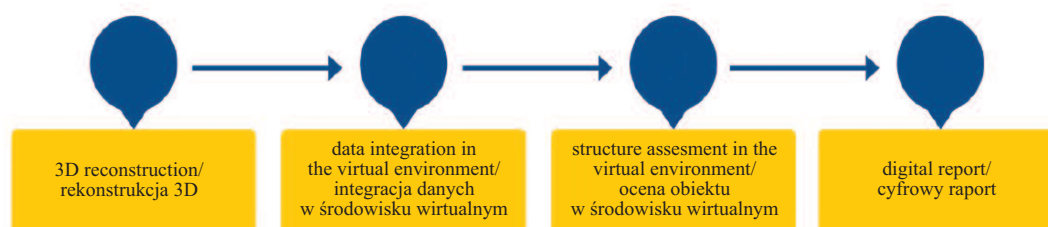


Fig. 10. Inspection process using virtual techniques
Rys. 10. Proces inspekcji z użyciem technik wirtualnych

Summary

The results of the conducted research indicate the high applicability of 3D reconstruction in the inspection of bridge structures, particularly in hard-to-reach areas. The use of integrated methods proves to be very effective in situations where one of the techniques is limited due to site conditions or the characteristics of the structure, for example, elements located at height that would require aerial scanning, or shaded areas that hinder reconstruction using photogrammetric techniques. The combination of both methods allows for mutual compensation of limitations and increases diagnostic efficiency, both in terms of measurement quality and the visual clarity of the models.

The analyses also showed that increasing the amount of input data (e.g., photographs) beyond a certain level does not lead to noticeable improvements in the quality of visual models and may only extend processing time. This is an important guideline when planning reconstruction missions. On the other hand, the required minimum number of photographs and scanner stations, as well as the parameters of the selected equipment, should always be chosen individually, depending on the dimensions and complexity of the diagnosed structure and the objective of the inspection.

The resulting models also form a basis for creating solid models that can be further developed into BIM models used in the ongoing management of bridge infrastructure. Additionally, implementing these models in the Unity virtual environment enables the integration of geometric data with information about damages, opening new analytical possibilities through the use of virtual reality techniques. The proposed approach, after further testing, offers promise for effective application in the diagnostics of other types of bridge infrastructure structures, not only the pier analyzed in this study.

oraz ich przetworzenie i integrację, aż po utworzenie modelu bryłowego wraz z rejestracją informacji o stanie technicznym bezpośrednio w wirtualnym środowisku. Inspektor, operując w środowisku VR lub na dużym ekranie, może dokonać oceny konstrukcji, oznaczyć nieprawidłowości, a następnie sporządzić cyfrowy raport z inspekcji. Schemat przedstawiający cały proces postępowania zaprezentowano na rysunku 10.

Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na bardzo dużą przydatność rekonstrukcji 3D w inspekcjach obiektów mostowych, szczególnie w miejscach trudno dostępnych. Zastosowanie integracji okazuje się bardzo skuteczne w sytuacjach, gdy jedna z metod ma ograniczenia wynikające z warunków terenowych lub charakterystyki obiektu np. wysoko położone elementy, które wymagałyby użycia skanera z powietrza lub zacienione miejsca utrudniające rekonstrukcję przy użyciu technik fotogrametrycznych. Połączenie obu metod pozwala więc na wzajemne uzupełnienie braków i zwiększenie efektywności diagnostycznej, zarówno pod względem jakości pomiarowej, jak i czytelności wizualnej modeli.

Przeprowadzone analizy pokazały również, że zwiększanie liczby danych wejściowych (np. zdjęć) powyżej pewnego poziomu nie prowadzi do zauważalnej poprawy jakości modeli wizualnych, a może jedynie wydłużać czas przetwarzania. Jest to istotna wskazówka przy planowaniu misji rekonstrukcyjnych. Natomiast wymagana minimalna liczba zdjęć i stanowisk skanera oraz parametry wybranego sprzętu powinny być każdorazowo dobierane indywidualnie, w zależności od gabarytów i stopnia skomplikowania diagnozowanego obiektu oraz celu inspekcji.

Otrzymane modele stanowią jednocześnie bazę do tworzenia modeli bryłowych, które mogą być rozwijane do formy modeli BIM, wykorzystywanych w dalszym zarządzaniu infrastrukturą mostową. Dodatkowo, implementacja tych modeli w wirtualnym środowisku Unity umożliwia integrację danych geometrycznych z informacjami o uszkodzeniach, otwierając nowe możliwości analityczne przy wykorzystaniu technik wirtualnej rzeczywistości. Zaproponowane podejście, po dalszych testach daje nadzieję na skuteczne wykorzystanie w diagnostyce innych rodzajów obiektów infrastruktury mostowej, a nie tylko omówionego filara.

Received: 17.03.2025
 Revised: 05.05.2025
 Published: 23.07.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 17.03.2025 r.
 Otrzymano poprawiony po recenzjach: 05.05.2025 r.
 Opublikowano: 23.07.2025 r.

Literature

- [1] Hubbard B i Hubbard S. Unmanned Aircraft Systems (UAS) for Bridge Inspection Safety. *Drones*. 2020; <https://doi.org/10.3390/drones4030040>.
- [2] Liu P, Shi Y, Xiong R i Tang P. Quantifying the reliability of defects located by bridge inspectors through human observation behavioral analysis. *Developments in the Built Environment*. 2023; <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100167>.
- [3] Kim I-H, Yoon S, Lee JH, Jung S, Cho S i Jung H-J. A comparative study of bridge inspection and condition assessment between manpower and a UAS. *Drones*. 2022; <https://doi.org/10.3390/drones6110355>.
- [4] Isailović D, Stojanović V, Trapp M, Richter R, Hajdin R i Döllner J. Bridge damage: Detection, IFC-based semantic enrichment and visualization. *Automation in Construction*. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103088>.
- [5] Yasin Yigit A i Uysal M. Virtual reality visualisation of automatic crack detection for bridge inspection from 3D digital twin generated by UAV photogrammetry. *Measurement*. 2025; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115931>.
- [6] Kwiatkowski J, Anigacz W i Beben D. A case study on the noncontact inventory of the oldest European cast-iron bridge using terrestrial laser scanning and photogrammetric techniques. *Remote Sensing*. 2020; <https://doi.org/10.3390/rs12172745>.
- [7] Dogan Y. 3D Modelling of Bridges by UAV Photogrammetry Method [online]. <https://www.academia.edu/121885671> [Dostęp: 10.04.2025].
- [8] Chen Z, i in. Automated reality capture for indoor inspection using BIM and a multi-sensor quadruped robot. *Automation in Construction*. 2024; <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105930>.
- [9] Luo H, Zhang J, Liu X, Zhang L i Liu J. Large-Scale 3D Reconstruction from Multi-View Imagery: A Comprehensive Review. *Remote Sensing*. 2024; <https://doi.org/10.3390/rs16050773>.
- [10] Han Y, Feng D, Wu W, Yu X, Wu G i Liu J. Geometric shape measurement and its application in bridge construction based on UAV and terrestrial laser scanner. *Automation in Construction*. 2023; <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104880>.
- [11] Lin JJ, Ibrahim A, Sarwade S i Golparvar-Fard M. Bridge inspection with aerial robots: automating the entire pipeline of visual data capture, 3D mapping, defect detection, analysis, and reporting. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2021; [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cp.1943-5487.0000954](https://doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000954).
- [12] Michałowska K. i in. Modelowanie i wizualizacja danych 3D na podstawie pomiarów fotogrametrycznych i skaningu laserowego, Rzeszów, Wyższa Szkoła Inżynieryjno-Ekonomiczna, 2015.
- [13] Mikrut S, Moskal A, Marmol U. Integration of Image and Laser Scanning Data Based on Selected Example. *Image Processing & Communications*. 2014; <https://doi.org/10.1515/ipc-2015-0008>.
- [14] Riveiro B, González-Jorge H, Varelá M I Jauregui D. V. Validation of terrestrial laser scanning and photogrammetry techniques for the measurement of vertical underclearance and beam geometry in structural inspection of bridges. *Measurement*. 2013; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.09.018>.
- [15] Dorafshan S i Maguire M. Bridge inspection: human performance, unmanned aerial systems and automation. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2018; <https://doi.org/10.1007/s13349-018-0285-4>.
- [16] Panigati T, i in. Drone-based bridge inspections: current practices and future directions. *Automation in Construction*. 2025; <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106101>.
- [17] Lizarraga-Morales RA, Sanchez-Yanez RE i Ayala-Ramirez V. Fast texel size estimation in visual texture using homogeneity cues. *Pattern Recognition Letters*. 2013; <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2012.09.022>.
- [18] Kim G i Cha Y. 3D Pixelwise damage mapping using a deep attention based modified Nerfacto. *Automation in Construction*. 2024; <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105878>.
- [19] Omer M, Margetts L, Hadi Mosleh M, Hewitt S, Parwaiz M. Use of gaming technology to bring bridge inspection to the office. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2019; <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1615962>.