

CRACOVIANA

IZABELA PIECH

PhD Eng.

University of Agriculture in Krakow
Faculty of Environmental Engineering and Land Surveying
e-mail: Izabela.Piech@urk.edu.pl
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6710-4387>

BARTŁOMIEJ CICHON

MSc Eng.

University of Agriculture in Krakow
Faculty of Environmental Engineering and Land Surveying
e-mail: bartlomiej.cichon@urk.edu.pl

3D MODELLING OF THE KRAKÓW BARBICAN USING PHOTOGRAMMETRIC METHODS

MODELOWANIE 3D BARBAKANU KRAKOWSKIEGO Z WYKORZYSTANIEM METOD FOTOGRAMETRYCZNYCH

ABSTRACT

Techniques related to 3D modelling have become a very important element of modern photogrammetry. They allow us to depict reality in an interesting, effective and metrical way. Three-dimensional models can be used for building surveying, reconstruction and presentation. The article presents selected aspects of data acquisition and processing using laser scanning techniques, unmanned aerial vehicles (UAVs) and short-range photogrammetry. The integration of this data has become a new tool that has expanded existing measurement capabilities, finding application in 3D modelling and creating a realistic building.

Keywords: terrestrial laser scanning, unmanned aerial vehicles, non-metric cameras, 3D modelling, visualization

STRESZCZENIE

Techniki związane z modelowaniem 3D stały się bardzo ważnym elementem współczesnej fotogrametrii. Pozwalają zobrazować rzeczywistość w ciekawy i efektywny sposób, z jednoczesnym zachowaniem metryczności. Modele 3D mogą być wykorzystywane do inwentaryzacji obiektów, ich rekonstrukcji i prezentacji. W artykule przedstawiono wybrane aspekty pozyskiwania i przetwarzania danych z wykorzystaniem techniki skanowania laserowego, bezzałogowych statków powietrznych (BSP) i fotogrametrii bliskiego zasięgu. Integracja tych danych stała się nowym narzędziem, które rozszerzyło dotychczasowe możliwości pomiarowe, znajdując zastosowanie w modelowaniu 3D i stworzeniu realistycznego obiektu architektonicznego.

Słowa kluczowe: naziemny skaning laserowy, bezzałogowe statki powietrzne, kamery niemetryczne, modelowanie 3D, wizualizacja



1. INTRODUCTION

This paper discusses the use of photogrammetric methods for 3D modelling of buildings. Photogrammetry has been finding practical application in this type of work for many years. Photogrammetric methods are increasingly used in other (technical sciences, medicine, entertainment, travel planning). This is possible due to, among others, the rapid development of information technology, equipment and software used to process the acquired data. Photogrammetry used to be associated only with taking photographs of ground objects and aerial photographs for mapping. Now the scope of this field is limited only by our imagination and creativity. One of the applications is 3D modelling of objects. The methods used for modelling are constantly improved with new algorithms that allow you to create them with greater accuracy. New, specialized programs and hardware allow for more effective model creation.

The aim of the research was to data acquisition and processing present the in creating a 3D model of a historic building, detailing its more interesting elements.

In the course of the study, attention was paid to the accuracy of generating the details of the selected object based on the integration of the data used.

The measurements included data obtained from the LeicaScanStation P40 scanner, the DJI Mini 2 unmanned aerial vehicle and the Sony a6300 non-metric camera. The whole thing was developed in RealityCapture. 3D modelling is becoming more and more popular and more accessible. It is used in architecture, documentation of monuments, visiting interesting places (Szymczyk, 2018, pp. 176–185), 3D printing, computer games, visualizations, forensics, industry, medicine, education (Plakhotniuk et al., 2020; Szymczyk 2017, pp. 3513–3519; Szymczyk and Skulimowski, 2017, pp. 6570–6577). Both digital images and the commonly used laser scanning technique are used to generate them, due to the high density of mapped points (Briess, 2005). The main advantage of terrestrial laser scanning is the ability to perform accurate and non-invasive measurements of the geometry of historic buildings. Historic buildings are often located in compact old town districts or are surrounded by lush vegetation, which limits the possibility of their imaging (Angello and Lo Brutto, 2007). In this case, there is a need to integrate photogrammetric data from the air and terrestrial platforms, additionally supplemented by other sources. Such a source can be digital cameras, whose the level of technical advancement allows them to be successfully used in close-range photogrammetry (Tokarczyk and Boroń, 2000) and recently also

in low-altitude aerial photogrammetry (unmanned aerial vehicles). Markowski (2020) briefly presents the principles of measurements with a terrestrial scanner and their development. He raises another aspect that in architectural buildings on the facades there are often various types of cornices, rustication, sculptural elements. Complex details are almost impossible to reproduce perfectly. The author of the above article puts laser scanning as the solution to all these problems (Markowski, 2020, pp. 50–53). Kędzierski et al. (2010) noticed that terrestrial laser scanning is becoming more and more popular, all due to the accuracy and quick acquisition of data. Research work has proven that terrestrial laser scanning is a suitable tool for visualization and 3D models of both architectural buildings and for conservation purposes. The authors address the problem of properly capturing the entire object both during scanning and when taking ground and aerial photographs.

In this case, attention should be paid to the appropriate selection of stations, their number, as well as the location and setting of appropriate scanning parameters (Kędzierski et al., 2010, pp. 211–221). Research on the use of terrestrial scanning to register cultural heritage objects has been conducted for several years around the world, as evidenced by the works (Buckley et al., 2006; Boehler and Marbs, 2004; Lichti et al., 2002, pp. 27–32). 3D laser scanner is one of the tools for survey documentation of the overall building in the accurate way. The importance of 3D laser scanning is providing a full surface description instead of measuring some specific points. Although new generations of terrestrial laser scanners offer many new features and improved performance, the most important feature is still the accuracy of the new systems for optimal use in a variety of applications. Laser scanning is characterized by the precise measurement of an object, resulting in a point cloud of several million points, which enables a very accurate survey. After an extensive processing phase, the collected data can be used to derive 2D drawings, 3D models useful for architectural drawings (Meltem, 2009, pp. 659–669). Kowalczyk (2012) states that terrestrial scanning is both an independent and independent spatial measurement technique, as well as a technique that, in combination with other methods (and IT tools), enables the preparation of integrated and comprehensive documentation of historic objects (Kowalczyk, 2012). The accuracy of 3D models of objects largely depends on the density of the point clouds used to create them (Drzewiecki and Bujakiewicz, 2018). The use of UAVs for 3D modelling was addressed in the following works (Uysal et al., 2013, pp. 659–662; Remondino et al., 2011, pp. 25–31). The authors express their opinions on

the use of photogrammetry for registering cultural heritage and generating photorealistic 3D models as the most accurate and fastest method. They state that obtaining data of complex and tall architectural structures may cause some problems.

To solve them, they propose the use of an unmanned aerial vehicle. BSP technology is also a topic addressed by (Sauerbier and Eisenbeiss, 2010, pp. 526–531; Żarnowski et al., 2015, pp. 54–63). Drones enable not only the preparation of photographic documentation from the ground level, but they can rise to a pre-planned height, moving around and taking a large number of photographs (Mazur and Chojnacki, 2017). Modelling objects using drones requires proper preparation. Before starting the research, the trajectory of its flight should be carefully planned, taking into account all terrain obstacles and factors that may affect the quality of the photos.

Photogrammetric studies of architectural objects are also based on digital images. The source material for this type of studies are digital images created, among others, as a result of scanning analogue photographs taken with metric cameras, as well as non-metric digital cameras. So far, the most popular technique for preparing architectural documentation has been close-range photogrammetry, based on photographic images and photoplans, orthoimages or vector drawings created on their basis. So created 3D models a source of information that can be used for measurement, surveying and visual purposes (Bujakiewicz et al., 2003, pp. 325–337); (Kwoczyńska and Rzepka, 2013, pp. 31–41; Nowak and Nowak, 2009, pp. 39–52; Habib et al., 2004). According to Zawieska (2008), 3D modelling can express the shape of an object by specifying its skeleton and texture.

The authors of the study formulated the purpose of the work, which was to acquire and process data in the creation of a 3D model using photogrammetric data.

1.1. Study area

The object of the study was the Kraków Barbican (Ill. 1). The Barbican was built on an incomplete circular plan with a diameter of 24.4 m inside the walls and more than 30 m outside. The Barbican was connected to the Floriańska Gate. Around it was a moat filled with water, 26 m wide and 6 m deep. Part of the walls, located under the water, were built of limestone stones bonded with lime mortar. Other parts were made of bricks. The walls built in this way were resistant to artillery fire.

Their thickness reached up to 3 m. The entire building consisted of 4 storeys, above which were machicolations (protruding parapets with openings in the floor). The structure was crowned by seven towers.

1.2. Methodics

Measurement work was carried out using the Leica ScanStation P40 ground scanner, the Sony a6300 mirrorless camera and the DJI Mini 2 unmanned aerial vehicle. Field work began with the acquisition of data in the form of point clouds using a terrestrial scanner, which measures points within a maximum radius of 270 m, its minimum range is 0.4 m. In one second, it is able to obtain up to a million points with an accuracy of ± 2 mm. The field of view of the instrument mirror is 360° horizontally and 270° vertically. To achieve the intended goal, seven measuring stations with reference spheres have been planned (Ill. 2). The stations have been arranged in a way that facilitates obtaining as much data as possible. A total of nine reference spheres were used for the measurement. The measurement was planned in such a way that the reference spheres from the first station could also be used from the last station. Each time, the instrument had to be levelled and basic settings had to be configured, such as: vertical and horizontal scanning range, scanning resolution set to 0.005 m, scanning mode, distance from the building. The device had to be set up in such a way as to scan the largest possible surface of the structure. The scanner was launched in the scan + photo mode, which means that at each station, apart from the point cloud, photographs were obtained on the basis of which it was possible to visualize the object in its original colour. An important function of the scanner was the ability to quickly define the scanning range in the horizontal plane. Due to the limitation of the scanning range, mainly information on the research object was obtained. This process resulted in shortening the time of measurement as well as data processing. The average time of acquiring a point cloud was mainly dependent on the width of the set range. It was in the range of 5 to 10 minutes (Ill. 2).

Performing laser scanning from several measuring stations forces the need to orient individual scans relative to each other and then combine them into a single whole.

In the work, orientation was performed using the automatic reference sphere detection function, as a result of which all scanner stations were connected. The orientation was performed with an average accuracy of 6.9 mm, a maximum error of 12.6 mm, and a minimum coverage of 15.6% (Ill. 3). For irregular, complex objects, e.g., figures, architectural details, we use algorithms that combine a point cloud into a dense triangular mesh, the so-called mesh. Mesh models allow a very accurate representation of the 3D geometry of the object along with preservation of the actual texture, resulting in a photorealistic 3D model. The quality of the resulting model is mainly influenced by the scanning conditions, such as the angle of inci-

dence of the laser spot and the placement of the positions. The next step was to take pictures using a drone, which was used in this measurement. A characteristic feature of the DJI Mini 2 drone used is its low weight of 249 g, it is equipped with a 1/2.3" CMOS sensor with a resolution of 12 MP, and a 35 mm lens. The photographs were taken based on the following principles: no limit to the number of photos, the highest available resolution was used, photographs had to be sharp, elements of the photographed object visible in at least two photos, the photographs were taken from different angles, a loop around the object has been created, the overlap between the shots should be as large as possible.

Before the start, the drone was calibrated in accordance with the manufacturer's recommendations. The connection between the controller and the drone and the GNSS signal were verified. In the first stage, the Point of Interest (POI) mode was used, in which the drone makes a circle of a given radius over a given point, while maintaining a certain height and speed, keeping the camera directed at the starting point. The drone was manually moved to a height of 15 m relative to the Barbican. Then, the radius was determined at 3 m from the photographed object. After determining the minimum orbital speed (to avoid blurred images), the orbiting of the object began automatically. The shutter was released every 2 seconds in order to maintain the longitudinal coverage above 70%. The flight was completed in 31 minutes. Due to the limited flight time of the drone, the acquisition of photographs was divided into several stages. About 1,000 photographs were taken during a single measurement session. The final stage was the selection of the obtained photos, where all out-of-focus images were discarded. RealityCapture allows you to link photographs together into a uniform block, even when we do not have any additional data. Another device used for the measurements was a non-metric camera (reflectorless camera) Sony a6300 with a 23.5 × 15.6 mm matrix and a resolution of 24.2 MP. The lens Sony E 18-105 mm f/4 PZ G and Sigma 16 mm f/1.6 DC DN from the Contemporary series were used. When using data from photographs taken with a non-metric camera, the number of photographs was not limited, a resolution of 24.2 MP was used, and each point was visible in at least two photos, a full loop was made around the object (Ill. 4). As part of a better match of the images, they were taken with a much higher coverage, which was above 70%, and constant lighting conditions were also maintained.

2. ELABORATION OF THE DATA OF THE KRAKÓW BARBICAN

Point clouds obtained from scanning have a disordered collection of a lot of information that has been analysed, registered and processed. In the first stage, components were created based on the collected data. The components used make it possible to add further data to an existing model without having to re-align the positions of all the photographs and scans used. The scans were then matched against each other. At the stage of data preparation in Faro Scene, the orientation of the scans was made. Orientation aims to combine single clouds of points obtained from individual measurement stations into one cloud, using the same targets or natural points scanned from different stations. In the case of the measurement made, the mapping of the same binding points, which were the reference spheres, was used. A sparse cloud consisting of 721,814 points was returned. These points, also known as match points, are detected in two or more images. They are a kind of link between adjacent photographs that enables achieving relative 3D positioning. The next step was to create a dense point cloud, clearing it of the so-called noises, model texturing, i.e., arranging elements into one coherent, specific pattern that increases the visual effect of the model presentation. The final stage was to export the finished component.

Then, data obtained with a drone and a mirrorless camera were used. The photo processing procedure is similar to the data obtained with the scanner. The difference is that the photographs do not have prior alignment. The positions of the cameras relative to the point cloud are shown in (Ill. 5). In the next stage of the work, all obtained components were combined using the Merge Components function. The algorithm automatically connects all elements based on overlapping points. As a result, 3792 aligned images were obtained, but one of the elements was not connected to the main component. The problem that the algorithm had to deal with was too low overlapping between the components.

In such a situation, we can use two ways to align the problematic element: The first way is to change the alignment settings, so that the algorithm will use a larger area of the photo and search for connecting points with greater strength. The second method is to manually add control points on the problematic component and on the main one. For the purposes of the publication, the second method was used, which added a total of nine control points. After restarting the Merge Components function, the algorithm successfully merged all components. The total alignment time of the 3,947 images and 7 clouds from the terrestrial laser scanner was 1 hour and 5 minutes. A total

of 3,255,489 points were obtained with an average error of 0.46 of pixel. Nine control points were used for measurement. The alignment report includes: average drone trajectory length 4.7, maximum mapping error of 2.0 pixel, median mapping error of 0.32 pixel (Ill. 6).

The next step is to perform a visual inspection of the quality of the reconstruction. RealityCapture displays blue lines that indicate the relationship between the cameras. The denser the network, the better the quality of the model we are able to obtain (Ill. 7). The next step was to make a model consisting of a mesh of triangles. To carry out the calculations, the Create Model – High Detail function was used, thanks to which RealityCapture creates a mesh on the basis of the depth map. The algorithm created a model consisting of 211 parts with a total number of triangles of 205,007,338. RealityCapture allows you to display a live model of up to 40 million triangles (Ill. 8).

In order to present the model in full quality, the View Tools - Clipping Box tool was used, which limits the displayed vertices to the designated area. The difference in the quality of the mesh can be seen in places where, due to the exposure of the photographs taken, less information was recorded (Ill. 9). The interiors of the window openings are dark, which causes the mesh to be deformed.

A way to get a better effect would be to take photographs with different exposures and then combine them into one HDR (High Dynamic Range) image. Worse mesh quality was also noted on some observation towers (Ill. 10). This was due to the number and direction of the photographs taken. Where the photographs were taken as a complete loop around the object, the mesh is more detailed. A smoother surface of the turret roof and its joints can be seen. At a later stage, the model was manually cleaned, getting rid of almost the entire area around the modelled object, while elements of the old moat were preserved to better reflect the characteristics of the Barbican. Then the Analyze – Close Holes function was launched, which is responsible for closing any holes in the model. The next step was to clean the model from topological errors. To obtain a realistic appearance of the model, the process of colouring the triangle mesh had to be carried out. RealityCapture has the function of colour correction of individual input photos. Due to the fact that the images were acquired in stages and at different time intervals and using different cameras, they should be brought to the same colour and exposure. It is important to mark only characteristic photographs from one device, acquired on the same day. Then we run the Correct Colors function, which will bring all photographs to similar colours and exposure. The effects of the above-mentioned activities are shown in figures 11–15. Illustration 11 shows the 3D Model

of the Barbican from the southwest side. Illustration 12 3D Model from Basztowa Street, Illustration 13 3D Model of the gate on the west side including its details, Illustration 14 3D Model for the west moat and gate, Illustration 15 3D Model of the memorial plaque placed on the wall of the Barbican.

3. PRESENTATION OF RESULTS

The scope of the study included both field and camera work. As a result of the measurements, ground photographs and point clouds were acquired. Registration of clouds obtained from laser scanning was performed. Acquisition of point clouds based on BSL images was also carried out. This article proves that laser scanning can be used to solve the problem of reproducing architectural details, while the use of photogrammetry in architecture, especially for obtaining geometric data, preparing 3D models and survey drawings. The Kraków Barbican being developed in the present work has details that, thanks to the laser scanner measurement, could be modelled in the selected software. A comparison of the photogrammetric method with the laser scanning method proves that both have their advantages and disadvantages. Integration of both methods can provide more precise data. Not only does BSP technology make it possible to produce photographic documentation from ground level, but drones can rise to a pre-planned altitude, moving around taking a large number of images. Models of objects obtained by photogrammetric methods are characterized by high accuracy and detail, unlike models created in generally available and easy-to-use web-based programs. An important aspect to address during 3D modelling is the following locating historic buildings in compact buildings surrounded by lush vegetation. In this case, there is a need to integrate photogrammetric data from the air and ground platforms, additionally supplemented by other sources.

4. CONCLUSIONS

In conclusion, the combination of professional equipment makes it possible to obtain a 3D model of very good quality. The purpose of the study was to acquire and process data in the creation of a 3D model of a historical structure, detailing its more interesting elements. In the course of the study, attention was paid to the accuracy of generating the details of the selected object based on the integration of the applied data.

The number of reference points significantly affects the process of combining two independent point clouds. When creating a point cloud using photogrammetry, an important role is played by the appropriate longitudinal and transverse coverage of the images. Data

acquisition using photogrammetry and laser scanning techniques is definitely faster than classical surveying methods. The density of the point cloud has a significant impact on its use in 3D modelling. Such a solution has been proposed in this publication. To summarize, the combination of professional equipment allows you to get a three-dimensional model of very good quality. Thanks to data integration, much better quality was obtained used in the article, a 3D model of the selected object with all its details was obtained. The value of data obtained in this way is demonstrated by the example of the fire of the Notre-Dame de Paris cathedral, where a 3D model of the monument was made a few years before it became damaged. During the development, problems were encountered related to: the quality of ground photos, the complexity of numerous architectural details. The quality of the point cloud translates directly into the ability to render detail and visualization of object edges. The completeness of the point cloud is also very important. In places

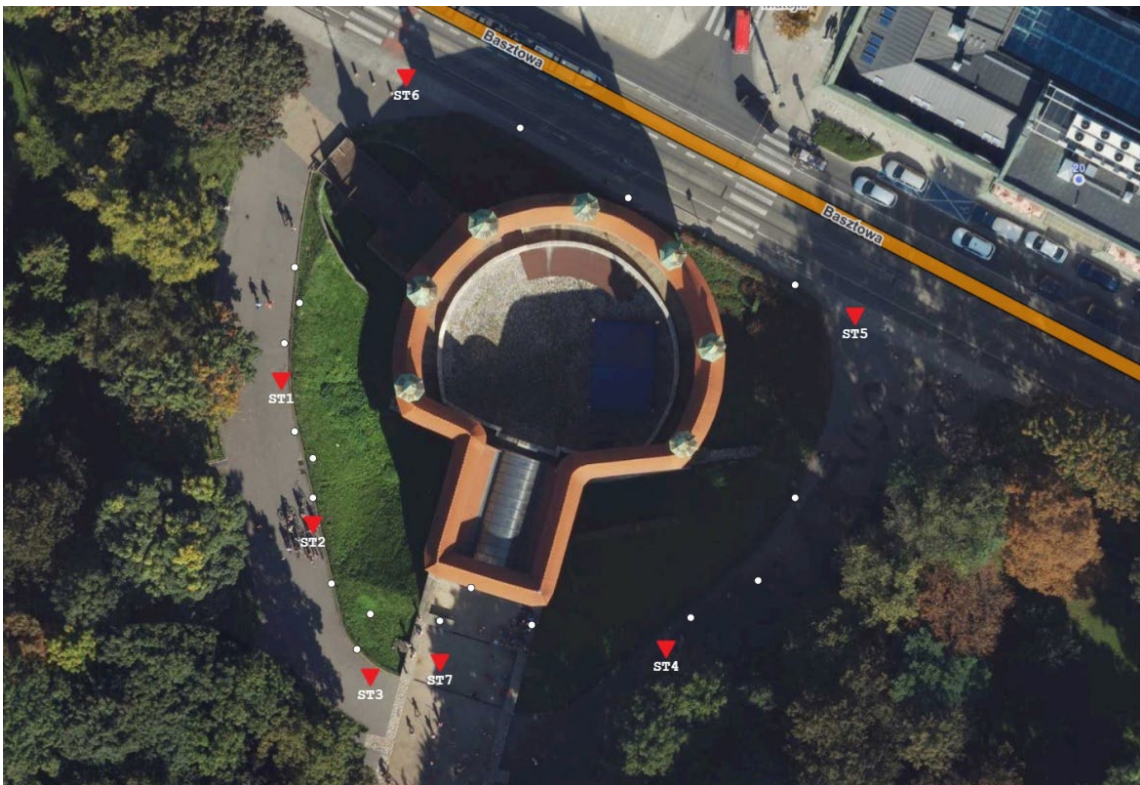
where the focus is lost, the quality of the images and a small number of photographs are taken, the point cloud loses, and thus, in effect, the 3D model. Where photographs are taken with sufficient quality and are sufficiently complete, the point cloud and the model are clear and reflect reality.

Thanks to the data obtained then, it will be easier to carry out the reconstruction process. Laser scanning and photogrammetry techniques differ significantly in the method of data acquisition. Photogrammetric methods (single-image studies) are reliable for creating high-resolution photoplans. The laser scanning method, on the other hand, allows for simpler and faster creation of vertical cross sections, horizontal cross sections and surface developments. Having laser scanning and photogrammetry technology at one's disposal at the same time, raises probably the best conditions for the preparation of architectural documentation of objects and buildings in terms of accuracy, quality and cost of execution.



III. 1. The Kraków Barbican. Source: Wikipedia (https://pl.wikipedia.org/wiki/Barbakan_w_Krakowie, accessed: 31.12.2023).

II. 1. Barbakan krakowski. Źródło: Wikipedia (https://pl.wikipedia.org/wiki/Barbakan_w_Krakowie, dostępne: 31.12.2023).

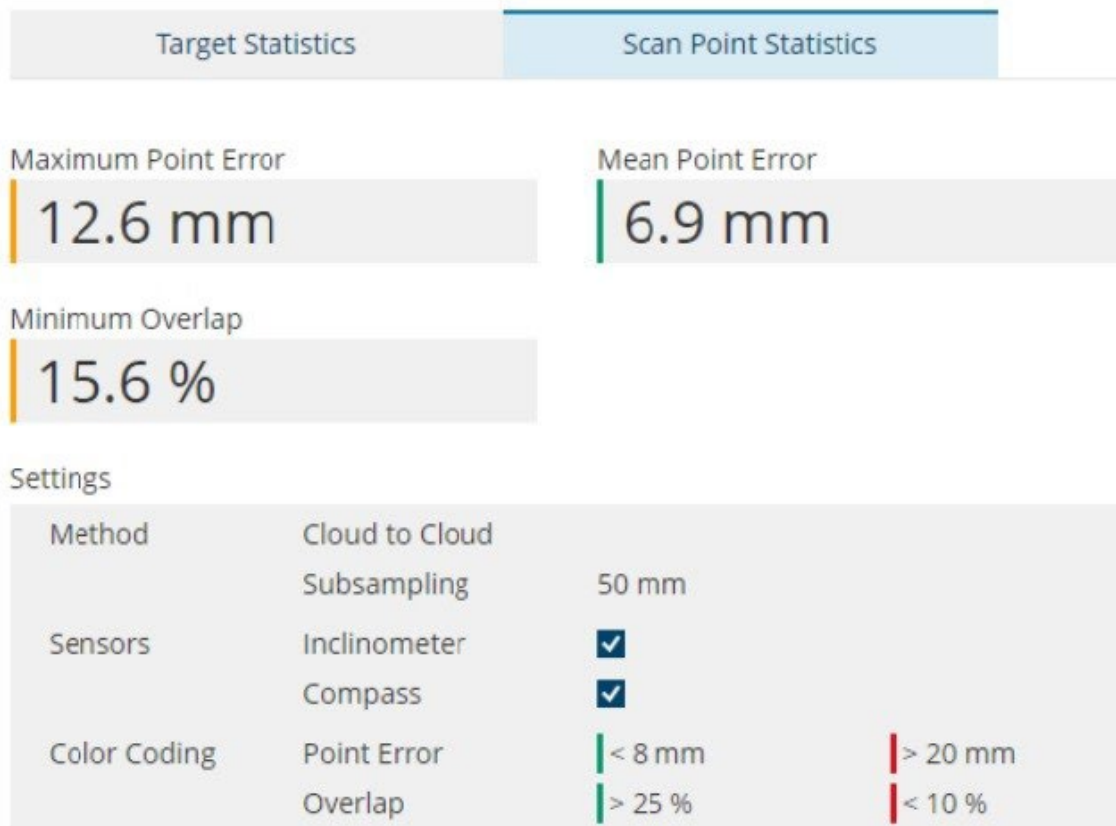


III. 2. Location of scanner stations and reference spheres. Source: original work.

II. 2. Rozmieszczenie stanowisk skanera oraz kul referencyjnych. Źródło: opracowanie własne.

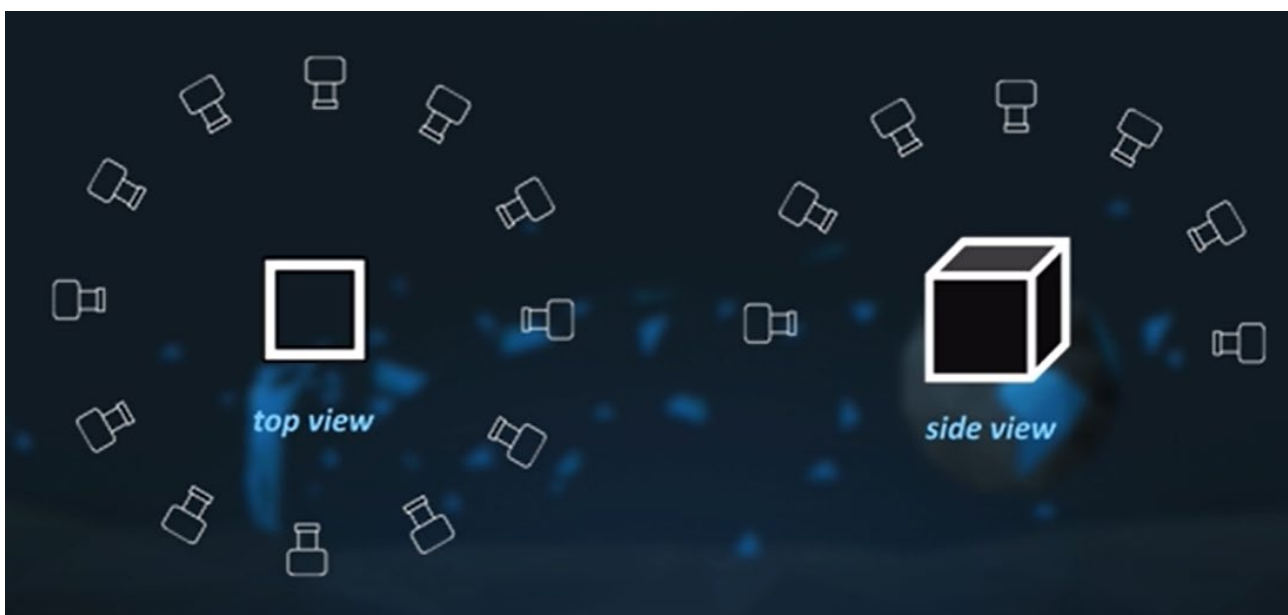
Registration Report for Cluster

Scans



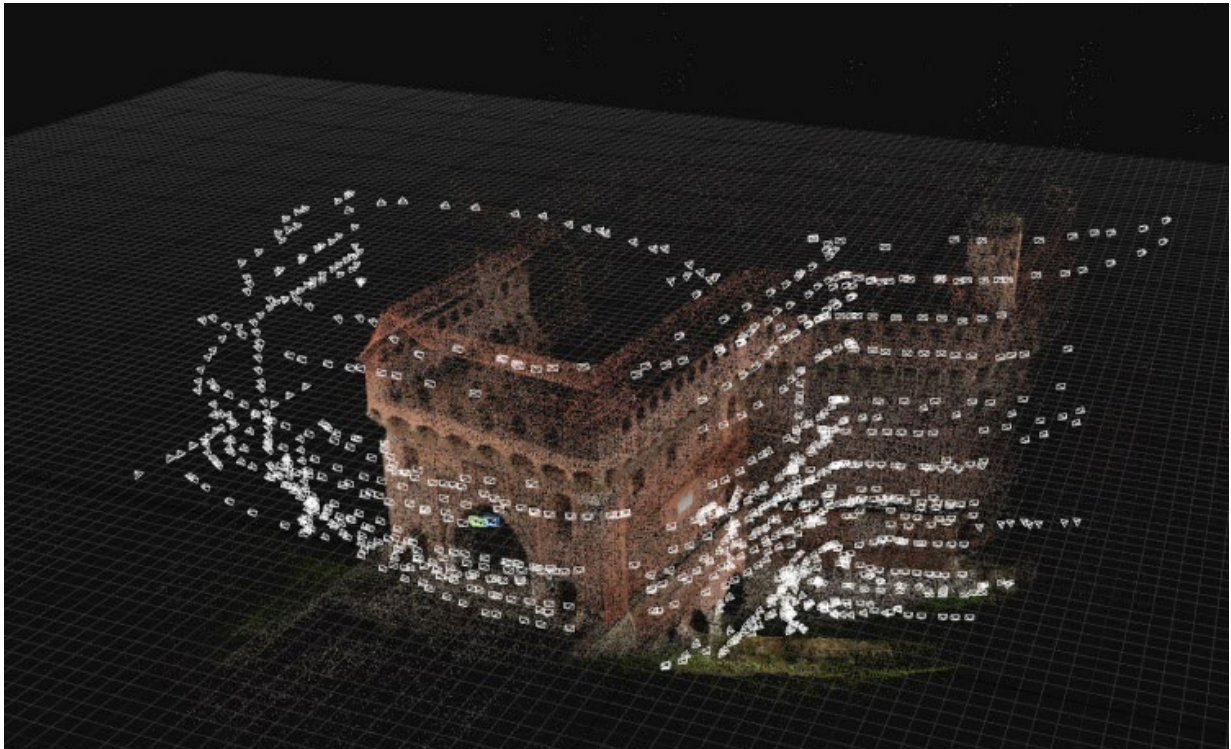
Ill. 3. Report showing orientation errors. Source: original work.

Il. 3. Raport przedstawiający błędy orientacji. Źródło: opracowanie własne.



Ill. 4. The position of the non-metric camera when taking pictures Source: original work.

Il.4. Położenie kamery niemetrycznej w trakcie wykonywania zdjęć. Źródło: opracowanie własne.



III. 5. Camera positions relative to the point cloud. Source: original work.

II. 5. Pozycje kamer względem chmury punktów. Źródło: opracowanie własne.

Project location	
Number of inputs	3947
Number of components	1
Number of models	0

Component: cale

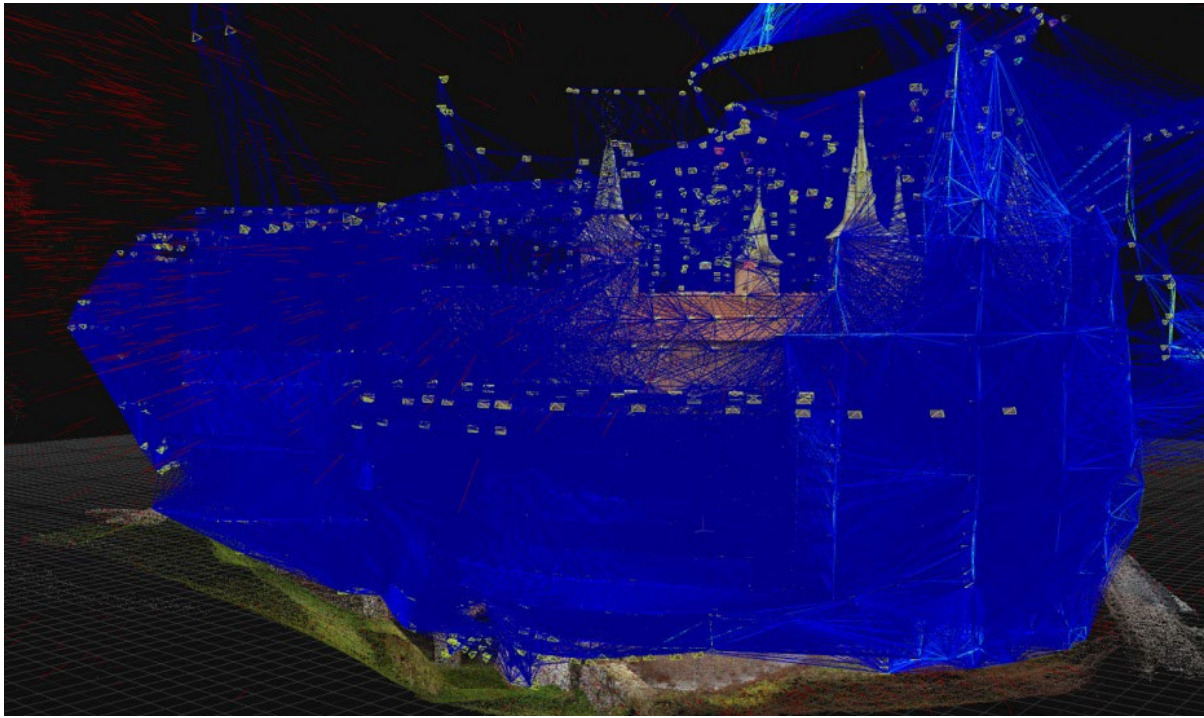
Count of registered images	3947 / 3947
Points' count	3255489
Count of used control points	9
Count of used constraints	0
Number of models	0

Alignment report

Total projections	15230248
Average track length	4.7
Maximal reprojection error [pixels]	2.00
Median reprojection error [pixels]	0.32
Mean reprojection error [pixels]	0.46

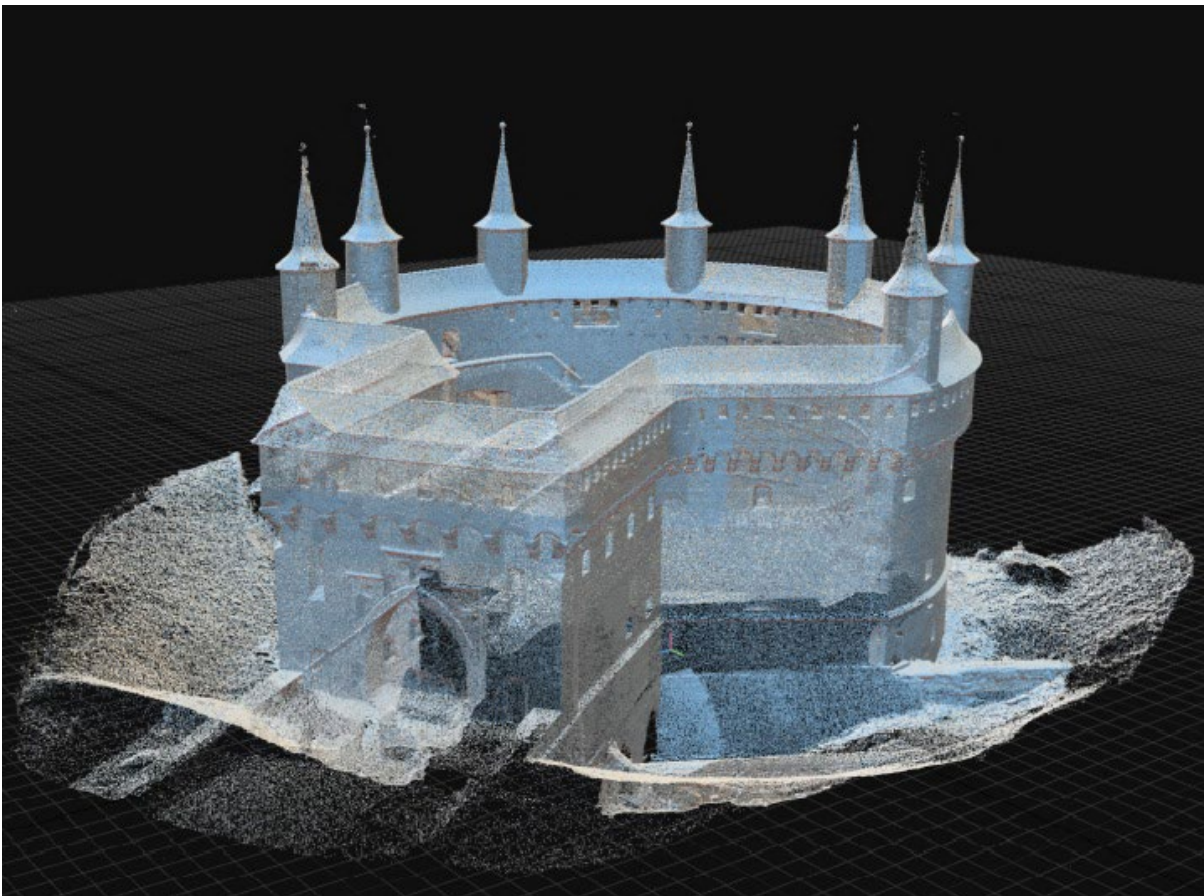
III. 6. RealityCapture photo alignment report. Source: original work.

II. 6. Raport wyrównania zdjęć w RealityCapture. Źródło: opracowanie własne.



III. 7. Visual inspection of the quality of connections between cameras showing areas of incomplete coverage. Source: original work.

II. 7. Inspekcja wizualna jakości połączeń między kamerami obrazująca obszary niepełnego pokrycia. Źródło: opracowanie własne.



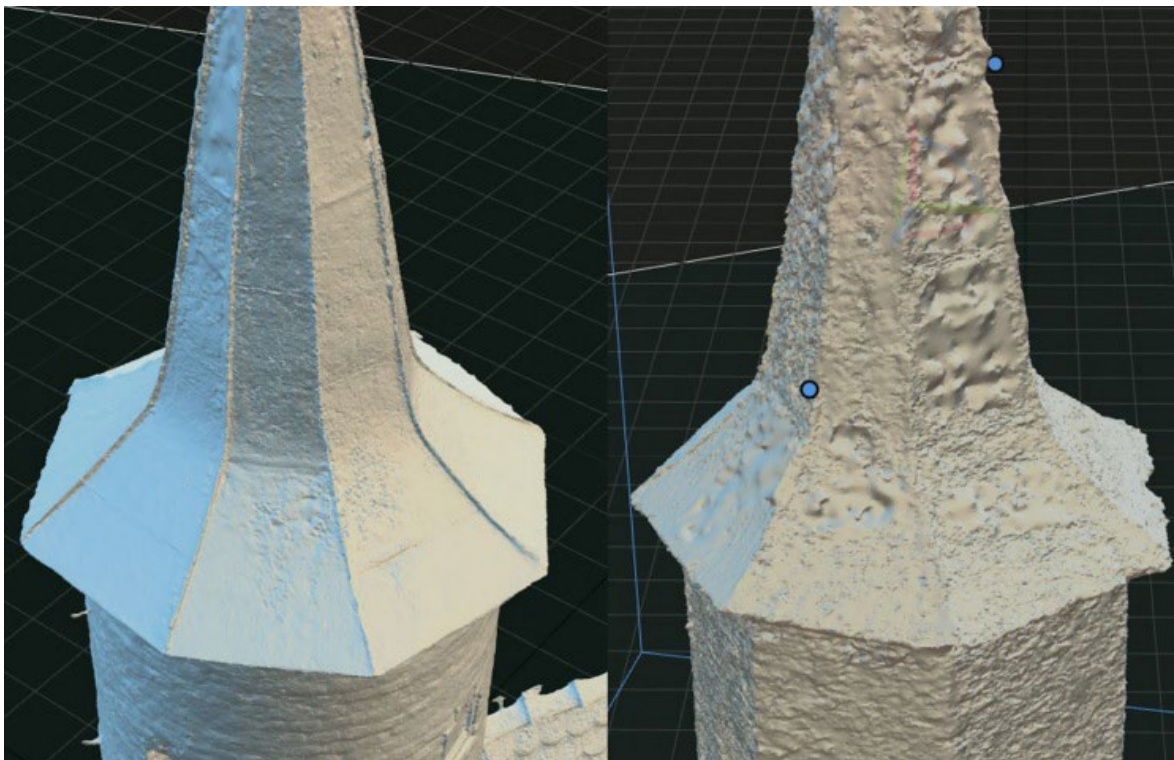
III. 8. Dense point cloud limited to 40 million vertices. Source: original work.

II. 8. Gęsta chmura punktów ograniczona do 40 milionów wierzchołków. Źródło: opracowanie własne.



III. 9. View of the mesh and the actual photo of the object. Source: original work.

II. 9. Widok na siatkę mesh oraz rzeczywiste zdjęcie obiektu. Źródło: opracowanie własne.



III. 10. Comparison of the mesh for the observation tower. Source: original work.

II. 10. Porównanie siatki mesh dla wieży obserwacyjnej. Źródło: opracowanie własne.



III. 11. 3D model on the southwest side. Source: original work.

II. 11. Model 3D od strony południowo-zachodniej. Źródło: opracowanie własne.



III. 12. 3D model from Basztowa Street. Source: original work.

II. 12. Model 3D od ulicy Basztowej. Źródło: opracowanie własne.



III. 13. 3D model of the gate on the west side including its details. Source: original work.

II. 13. Model 3D bramy od strony zachodniej z uwzględnieniem jej detali. Źródło: opracowanie własne.



Ill. 14. 3D model of the western moat and wicket. Source: original work.

Il. 14. Model 3D na zachodnią fosę i furtę. Źródło: opracowanie własne.



Ill. 15. 3D model of the memorial plaque placed on the wall of the Barbican. Source: original work.

Il. 15. Model 3D tablicy pamiątkowej umieszczonej na ścianie Barbakanu. Źródło: opracowanie własne.

1. WPROWADZENIE

Tematem badawczym podjętym w artykule jest wykorzystanie metod fotogrametrycznych do modelowania 3D obiektów architektonicznych. Fotogrametria od wielu lat znajduje praktyczne zastosowanie w tego typu pracach. Metody fotogrametryczne coraz częściej znajdują zastosowanie w innych naukach technicznych (geodezja, architektura, budownictwo), innych dziedzinach wiedzy, jak na przykład medycyna, a także w życiu codziennym (rozrywka, planowanie podróży, zwiedzanie). Pozwalają na to m.in.: szybki rozwój technik informatycznych, nowoczesny sprzęt, a także wykorzystywane oprogramowanie do przetwarzania pozyskanych danych. Niegdyś fotogrametria była kojarzona tylko z robieniem zdjęć obiektów naziemnych oraz lotniczych do sporządzania map. Teraz zakres tej dziedziny ograniczają tylko... nasza wyobraźnia i kreatywność. Jednym z jej zastosowań jest modelowanie 3D obiektów. Metody wykorzystywane do modelowania są wciąż udoskonalane o nowe algorytmy pozwalające tworzyć je z większą dokładnością. Nowe, specjalistyczne programy oraz sprzęt pozwalają na efektywniejsze tworzenie modeli.

Celem badań było pozyskanie i przetworzenie danych przy opracowaniu modelu 3D obiektu zabytkowego z wyszczególnieniem jego ciekawszych elementów. W toku opracowywania zwrócono uwagę na dokładność generowania detali wybranego obiektu w oparciu o integrację zastosowanych danych.

Pomiary obejmowały dane pozyskane ze skanera Leica ScanStation P40, bezzałogowego statku powietrznego DJI Mini 2 i kamery niemetrycznej Sony a6300. Całość została opracowana w programie RealityCapture. Modelowanie 3D jest coraz bardziej popularne i dostępne, przez co znajduje zastosowanie w architekturze, dokumentacji zabytków, zwiedzaniu ciekawych miejsc (Szymczyk, 2018, s. 176–185.), druku 3D, grach komputerowych, wizualizacjach, kryminalistyce, przemyśle, medycynie, edukacji (Plakhotniuk i in., 2020; Szymczyk, 2017, s. 3513–3519; Szymczyk, Skulimowski, 2017, s. 6570–6577). Do generowania modeli 3D wykorzystywane są zarówno obrazy cyfrowe, jak i stosowana technika skaningu laserowego (Briess, 2005). Zasadniczą zaletą naziemnego skanowania laserowego jest możliwość wykonywania dokładnych i bezinwazyjnych pomiarów geometrii obiektów zabytkowych. Takie obiekty usytuowane są często w zwartej zabudowie staromiejskiej lub otoczone są bujną roślinnością, co ogranicza możliwość ich obrazowania (Angello, Lo Brutto, 2007). W takim przypadku występuje konieczność integracji danych fotogrametrycznych z platformy lotniczej i naziemnej, dodatkowo uzupełnianej innymi źródłami. Takim źródłem mogą być fotograficzne aparaty cyfrowe, któ-

rych poziom zaawansowania technicznego pozwala na stosowanie ich z powodzeniem w fotogrametrii bliskiego zasięgu (Tokarczyk, Boroń, 2000), a od niedawna także i w fotogrametrii lotniczej niskiego pułapu (bezzałogowe statki powietrzne).

Markowski (2020) w swoim artykule przedstawia zasady pomiaru skanerem naziemnym oraz ich rozwój. Porusza aspekt, iż na elewacjach często występują różnego rodzaju gzymsy, boniowania, elementy o charakterze rzeźbiarskim. Skomplikowane detale są wręcz niemożliwe do idealnego odtworzenia. Autor powyższego artykułu przedstawia skaningu laserowego jako rozwiązanie tych wszystkich problemów (Markowski, 2020, s. 50–53). Kędzierski i inni (2010) zauważyli, że technika naziemnego skaningu laserowego staje się coraz bardziej popularna, m.in. za sprawą dokładności oraz szybkiego pozyskiwania danych. Prace badawcze dowiodły, że naziemny skaningu laserowego jest odpowiednim narzędziem do wykonywania wizualizacji oraz modeli 3D zarówno budynków architektonicznych, jak i do celów konserwatorskich. Autorzy poruszają problem właściwego uchwycenia całego obiektu zarówno w trakcie skanowania, jak i w czasie wykonywania zdjęć naziemnych i lotniczych. Należy wówczas zwrócić uwagę na odpowiedni dobór stanowisk, ich liczbę, jak również lokalizację i ustawienie odpowiednich parametrów skanowania (Kędzierski i in., 2010, s. 211–221). Badania nad wykorzystaniem skaningu naziemnego do rejestracji obiektów dziedzictwa kulturowego prowadzone są od kilku lat na całym świecie, czego dowodem są prace (Buckley i in., 2006; Boehler, Marbs, 2004; Lichti i in., 2002, s. 27–32).

Trójwymiarowy skaner laserowy to jedno z narzędzi pozwalających na sporządzenie dokładnej inwentaryzacji budynku jako całości. Ważne jest, że trójwymiarowe skanowanie laserowe pozwala na pełny pomiar powierzchni, a nie tylko pomiar specyficznych punktów. Pomimo że nowe generacje naziemnych skanerów laserowych oferują wiele nowoczesnych funkcji i lepszą wydajność, nadal najważniejszą cechą jest dokładność nowych systemów w celu ich optymalnego wykorzystania w różnorodnych zastosowaniach. Skanowanie laserowe charakteryzuje się precyzyjnym pomiarem obiektu, którego wynikiem jest kilkumilionowa chmura punktów, co umożliwia bardzo dokładną inwentaryzację.

Po przetworzeniu zebrane dane można wykorzystać do tworzenia rysunków 2D i modeli 3D, które mogą być pomocne w przygotowywaniu dokumentacji architektonicznej (Meltem, 2009, s. 659–669). Kowalczyk (2012) stwierdza, że skanowanie naziemne stanowi zarówno samodzielną i niezależną technikę pomiaru przestrzennego, jak również technikę, która w połączeniu z innymi metodami oraz narzędziami

informatycznymi, umożliwia wykonywanie zintegrowanej i kompleksowej dokumentacji obiektów zabytkowych. Dokładność generowanych modeli 3D obiektów w dużej mierze zależy od gęstości chmur punktów wykorzystywanych do ich tworzenia (Drzewiecki, Bujakiewicz, 2018). Autorzy wyrażają opinie na temat zastosowania fotogrametrii do rejestracji dziedzictwa kulturowego i generowania fotorealistycznych modeli 3D jako najdokładniejszej i najszybszej metody. Tematykę wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych do modelowania 3D poruszyli w swoich pracach (Uysal i in., 2013, s. 659–662; Remondino i in., 2011, s. 25–31). Do ich rozwiązania proponują zastosowanie bezzałogowego statku powietrznego. Technologia BSP jest również tematem poruszonym w publikacjach (Sauerbier, Eisenbeiss, 2010, s. 526–531; Żarnowski i in., 2015, s. 54–63). Drony umożliwiają nie tylko sporządzenie dokumentacji fotograficznej z poziomu ziemi, ale mogą wznieść się na zaplanowaną wcześniej wysokość, a przemieszczając się wykonują dużą liczbę zdjęć (Mazur, Chojnacki, 2017). Modelowanie obiektów przy użyciu dronów wymaga odpowiedniego przygotowania. Przed przystąpieniem do badań należy dokładnie zaplanować trajektorię lotu, uwzględniając wszelkie przeszkody terenowe oraz czynniki, które mogą wpłynąć na jakość zdjęć. Opracowania fotogrametryczne obiektów architektonicznych opierają się również na obrazach cyfrowych. Materiałem źródłowym dla tego typu opracowań są obrazy cyfrowe powstałe między innymi w wyniku skanowania zdjęć analogowych wykonanych kamerami metrycznymi, a także niemetrycznymi aparatami cyfrowymi. Dotychczas najbardziej popularną techniką wykonywania dokumentacji architektonicznej była fotogrametria bliskiego zasięgu, bazująca na zdjęciach fotograficznych i tworzonych na ich podstawie fotoplanach, ortobrazach czy rysunkach wektorowych. Tak utworzone modele 3D stanowią źródło informacji, które można wykorzystać do celów pomiarowych, inwentaryzacyjnych i wizualnych (Bujakiewicz i in., 2003, s. 325–337; Kwoczyńska, Rzepka, 2013, s. 31–41; Nowak, Nowak, 2009, s. 39–52, Habib i in., 2004). Według Zawieskiej (2013, s. 295–302) poprzez modelowanie 3D można wyrazić kształt obiektu określając jego szkielet i teksturę.

Autorzy pracy sformułowali cel pracy, którym było pozyskanie i przetworzenie danych przy tworzeniu modelu 3D z wykorzystaniem danych fotogrametrycznych.

1.1. Obszar badań

Obiektem opracowania był Barbakan krakowski (il. 1). Barbakan został wzniesiony na planie niepełnego koła o średnicy 24,4 m wewnątrz murów i ponad 30 m na zewnątrz. Barbakan połączony był z Bramą Floriańską. Wokół znajdowała się fosa wypełniona wodą o szerokości

kości 26 m i głębokości 6 m. Część murów, położona pod wodą, zbudowana została z kamieni wapiennych połączonych zaprawą wapienną. Pozostałe części wykonano z cegieł. Tak zbudowane mury były odporne na ogień artyleryjski.

Ich grubość sięgała nawet 3 m. Cała budowla składała się z czterech kondygnacji, nad którymi były machikuły (wysunięte ganki z otworami w podłodze). Budowlę wieńczyło siedem wież.

1.2. Metody pracy

Prace pomiarowe wykonano przy użyciu skanera naziemnego Leica ScanStation P40, aparatu bezlusterkowego Sony a6300 oraz bezzałogowego statku powietrznego DJI Mini 2. Prace terenowe rozpoczęto od pozyskania danych w postaci chmur punktów przy użyciu skanera naziemnego, który wykonuje pomiary punktów maksymalnie w promieniu 270 m z minimalnym zasięgiem 0,4 m. W ciągu jednej sekundy można uzyskać do miliona punktów przy dokładności ± 2 mm. Pole widzenia lustra instrumentu wynosi w poziomie 360° , a w pionie — 270° . Do zrealizowania zamierzonego celu zaplanowano siedem stanowisk pomiarowych z rozmieszczonymi dziewięcioma kulami referencyjnymi (il. 2). Stanowiska rozmieszczone zostały w sposób ułatwiający pozyskanie jak największej ilości danych. Pomiar zaplanowano tak, aby sfery nawiazania z pierwszego stanowiska mogły być wykorzystane również z ostatniego stanowiska. Za każdym razem instrument spoziomowano oraz skonfigurowano podstawowe ustawienia, takie jak zakres skanowania w pionie i poziomie, rozdzielczość skanowania ustawiono na 0,005 m, tryb skanowania, odległość od obiektu. Nadrzędnym celem było ustawić instrument w taki sposób, aby zeskanować jak największą powierzchnię obiektu. Skaner został uruchomiony w trybie skan + zdjęcia, co oznacza, że na każdym stanowisku oprócz chmury punktów pozyskiwane były zdjęcia, na podstawie których można było zwizualizować obiekt w oryginalnym kolorze. Istotną funkcją skanera była możliwość szybkiego definiowania zakresu skanowania w płaszczyźnie poziomej. Ograniczenie zasięgu skanowania sprawiło, że pozyskane zostały głównie informacje dotyczące obiektu badań. Proces ten zapewnił skrócony czas pomiaru i opracowania danych. Średni czas pozyskania chmury punktów znajdował się w przedziale od 5 do 10 minut i był zależny w głównej mierze od szerokości ustawionego zakresu. Wykonanie skaningu laserowego z kilku stanowisk pomiarowych wymusza konieczność orientacji względem siebie pojedynczych skanów oraz późniejszego połączenia ich w całość. W pracy wykonano orientację z wykorzystaniem automatycznej funkcji wykrywania kul referencyjnych, w wyniku której połączono wszystkie stanowiska

skanera. Orientacja została wykonana ze średnią dokładnością 6,9 mm, błędem maksymalnym 12,6 mm, minimalnym pokryciem 15,6% (il. 3).

Dla nieregularnych, złożonych obiektów, np. figur, detali architektonicznych itp., wykorzystujemy algorytmy łączące chmurę punktów w gęstą siatkę trójkątów, tzw. mesh. Modele mesh pozwalają na bardzo dokładne odwzorowanie geometrii 3D obiektu wraz z zachowaniem rzeczywistej tekstury, dzięki czemu powstaje fotorealistyczny model 3D. Na jakość uzyskanego modelu mają wpływ przede wszystkim warunki skanowania, takie jak kąt padania plamki lasera i rozmieszczenie stanowisk, co zostało zastosowane w tym pomiarze.

Kolejnym etapem było wykonanie zdjęć za pomocą drona. Cechą charakterystyczną użytego drona DJI Mini 2 jest niewielka waga wynosząca 249 g, sensor o rozmiarze 1/2,3" CMOS o rozdzielczości 12 megapixeli, obiektyw 35 mm. Zdjęcia wykonano w oparciu o następujące zasady:

- brak ograniczenia liczby zdjęć;
- użycie najwyższej dostępnej rozdzielczości;
- odpowiednia ostrość zdjęć;
- widoczność elementów fotografowanego obiektu na minimum dwóch zdjęciach;
- wykonanie zdjęć pod różnymi kątami;
- stworzenie pętli wokół obiektu;
- jak największe pokrycie między zdjęciami.

Przed startem wykonano kalibrację drona zgodnie z zaleceniami producenta. Zweryfikowano połączenie kontrolera ze statkiem oraz sygnał GNSS. W pierwszym etapie wykorzystano tryb Point of Interest (POI), w którym dron zatacza koło o zadanym promieniu nad danym punktem, przy zachowaniu określonej wysokości i prędkości, utrzymując kamerę skierowaną na punkt początkowy. Dron został manualnie wprowadzony na wysokość 15 m względem Barbakanu. Następnie określony został promień 3 m od fotografowanego obiektu. Po ustaleniu minimalnej prędkości orbitowania, aby uniknąć rozmycia zdjęć, rozpoczęto okrążanie obiektu w sposób automatyczny. Migawka wyzwalana była co 2 sekundy w celu zachowania pokrycia podłużnego powyżej 70%. Lot został wykonany w czasie 31 minut. Z powodu ograniczonego czasu lotu drona, podzielono pozyskiwanie zdjęć na kilka etapów. Podczas pojedynczej sesji pomiarowej wykonano około 1000 fotografii. Końcowym etapem była selekcja uzyskanych zdjęć, gdzie odrzucono wszelkie nieostre obrazy. Następnie wykorzystano program RealityCapture, który umożliwia wzajemne powiązanie zdjęć w jednolity blok nawet wtedy, gdy nie posiadamy żadnych danych dodatkowych. Kolejnym urządzeniem użytym do pomiarów była kamera niemetryczna (aparat bezlustrkowy) Sony a6300 z matrycą 23,5 × 15,6 mm o rozdzielczości 24,2 Megapixeli.

Wykorzystano obiektyw Sony E 18–105 mm f/4 PZ G oraz Sigma 16mm m f/1.6 DC DN z serii Contemporary. W przypadku wykorzystania danych ze zdjęć wykonanych kamerą niemetryczną nie ograniczono liczby zdjęć, a każdy punkt był widoczny na co najmniej dwóch zdjęciach. Wykonano pełną pętlę wokół obiektu (il. 4). W ramach lepszego dopasowania zdjęć, wykonano je ze znacznie wyższym pokryciem, które wynosiło powyżej 70%, utrzymano również stałe warunki oświetleniowe.

2. OPRACOWANIE POZYSKANYCH DANYCH BARBAKANU KRAKOWSKIEGO

Chmury punktów pozyskane ze skanowania posiadały nieuporządkowany zbiór wielu informacji, który został poddany analizie, rejestracji i przetworzeniu. W pierwszym etapie stworzono komponenty na podstawie zebranych danych. Użyte komponenty dały możliwość dodawania kolejnych danych do istniejącego już modelu bez konieczności ponownego wyrównania pozycji wszystkich użytych zdjęć i skanów. Wykonano dopasowanie skanów względem siebie. Na etapie przygotowania danych w programie Faro Scene wykonano orientację skanów. Orientacja miała na celu połączenie pojedynczych chmur punktów uzyskanych z poszczególnych stanowisk pomiarowych, wykorzystując odwzorowanie tych samych tarcz celowniczych lub punktów naturalnych, zeskanowanych z różnych stanowisk. W przypadku wykonanego pomiaru wykorzystano odwzorowanie tych samych punktów wiążących, którymi były kule referencyjne. Otrzymano rzadką chmurę składającą się z 721 814 punktów. Punkty te nazywane inaczej punktami dopasowania, wykrywane były na przynajmniej dwóch lub więcej obrazach. Były one rodzajem łącznika pomiędzy sąsiadującymi zdjęciami, który pozwalał na uzyskanie względnego pozycjonowania 3D.

Następnym etapem było utworzenie gęstej chmury punktów, wyczyszczenie jej z tzw. szumów, następnie teksturowanie modelu, czyli uporządkowanie elementów w jeden spójny, określony wzór, który podnosił efekt wizualny prezentacji modelu. Końcowym etapem było wyeksportowanie gotowego komponentu. Do opracowania wykorzystano dane pozyskane dronem oraz aparatem bezlustrkowym. Procedura przetwarzania zdjęć wyglądała analogicznie jak w przypadku danych pozyskanych za pomocą skanera. Różnica polegała na tym, że zdjęcia nie posiadały wcześniejszego wyrównania. Pozycje kamer względem chmury punktów przedstawia (il. 5). W kolejnym etapie pracy wykonano połączenie wszystkich uzyskanych komponentów przy pomocy funkcji Merge Components. Algorytm automatycznie połączył wszystkie elementy

na podstawie pokrywających się punktów. W efekcie otrzymano 3792 wyrównanych zdjęć, jednak jeden z elementów nie został połączony z głównym komponentem. Problemem, z którym musiał sobie poradzić algorytm, było zbyt niskie pokrycie między komponentami. W takiej sytuacji można skorzystać z dwóch sposobów wyrównania problematycznego elementu: pierwszy to zmiana ustawień wyrównania, przez co algorytm będzie korzystał z większego obszaru zdjęcia i wyszukiwał punkty łączące z większą siłą; drugi to ręczne dodawanie punktów kontrolnych na problematycznym komponentcie oraz na głównym. Na potrzeby publikacji skorzystano z drugiego sposobu, przez co dodano łącznie 9 punktów kontrolnych. Po ponownym uruchomieniu funkcji Merge Components, algorytm poprawnie połączył wszystkie komponenty. Łączny czas wyrównania 3947 zdjęć oraz 7 chmur pochodzących z naziemnego skanera laserowego wynosił 1 godzinę i 5 minut. Łącznie uzyskano 3 255 489 punktów z błędem średnim wynoszącym 0,46 pixela. Do pomiaru wykorzystano 9 punktów kontrolnych. Raport wyrównania obejmuje: średnią długość trajektorii drona 4,7; maksymalny błąd odwzorowania 2,0 pix; błąd odwzorowania mediany 0,32 pix. (il. 6).

Kolejny etap to wykonanie wizualnej inspekcji jakości rekonstrukcji. RealityCapture wyświetla linie w kolorze niebieskim, które oznaczają wzajemne relacje pomiędzy kamerami. Im sieć jest gęstsza, tym lepszą jakość modelu jesteśmy w stanie uzyskać (il. 7). Następnym krokiem było wykonanie modelu składającego się z siatki trójkątów. Aby przeprowadzić obliczenia użyto funkcji Create Model – High Detail, dzięki której RealityCapture na podstawie mapy głębi tworzy siatkę mesh. Algorytm stworzył model składający się z 211 części o łącznej liczbie trójkątów 205 007 338. RealityCapture pozwala na wyświetlanie w czasie rzeczywistym modelu składającego się z maksymalnie 40 milionów trójkątów (il. 8). W celu prezentacji modelu w pełnej jakości korzystano z narzędzia View Tools – Clipping Box, które ogranicza wyświetlane wierzchołki do wyznaczonego obszaru. Różnicę w jakości siatki można dostrzec w miejscach, gdzie z powodu ekspozycji wykonanych zdjęć, zarejestrowano mniej informacji (il. 9). Wnętrza otworów okiennych są ciemne, przez co siatka jest zdeformowana. Sposobem na uzyskanie lepszego efektu byłoby wykonanie zdjęć z różnymi ekspozycjami, a następnie połączenie je w jeden obraz HDR (High Dynamic Range). Gorszą jakość siatki zanotowano także na niektórych wieżach obserwacyjnych (il. 10). Spowodowane to było liczbą i kierunkiem wykonanych zdjęć. Tam, gdzie zdjęcia wykonano jako pełną pętlę wokół obiektu, siatka jest bardziej szczegółowa. Dostrzec można bardziej gładką powierzchnię dachu wieżyczki oraz jej łączenia. W dalszym etapie wyczyszczono

model, pozbywając się prawie całego terenu wokół modelowanego obiektu, przy czym zachowano elementy starej fosy, aby lepiej oddać charakterystykę Barbakanu. Uruchomiono funkcję Analize – Close Holes, która odpowiada za zamknięcie ewentualnie powstałych dziur w modelu. Aby uzyskać realistyczny wygląd modelu, przeprowadzono proces kolorowania siatki trójkątów. RealityCapture posiada funkcję korekcji kolorów poszczególnych zdjęć wejściowych. Ze względu na to, że obrazy były pozyskiwane etapami oraz w różnych odstępach czasu i za pomocą różnych kamer, należało je doprowadzić do takiej samej kolorystyki i ekspozycji. Ważne było, aby oznaczyć tylko charakterystyczne zdjęcia pochodzące z jednego urządzenia, pozyskane tego samego dnia.

Następnie uruchamiono funkcję Correct Colors, która sprowadziła wszystkie zdjęcia do podobnej kolorystyki i ekspozycji. Efekty wyżej wymienionych czynności przedstawiono na ilustracjach 11–15: ilustracja 11 przedstawia Model 3D Barbakanu od strony południowo-zachodniej; ilustracja 12 — Model 3D od ulicy Basztowej; ilustracja 13 — Model 3D bramy od strony zachodniej z uwzględnieniem jej detali; ilustracja 14 — Model 3D na zachodnią fosę i furkę; ilustracja 15 — Model 3D tablicy pamiątkowej umieszczonej na ścianie Barbakanu.

3. PREZENTACJA UZYSKANYCH WYNIKÓW

Zakres opracowania obejmował zarówno prace terenowe, jak i kameralne. W wyniku pomiarów pozyskano zdjęcia naziemne oraz chmury punktów. Wykonana została rejestracja chmur otrzymanych ze skaningu laserowego. Dokonano również pozyskania chmur punktów na podstawie zdjęć z BSL. Niniejszy artykuł dowodzi, iż skaning laserowy można wykorzystać do rozwiązania problemu z odtworzeniem detali architektonicznych, natomiast wykorzystanie fotogrametrii w architekturze służy szczególnie do uzyskiwania danych geometrycznych, przygotowywania modeli 3D i rysunków inwentaryzacyjnych. Model 3D Barbakanu krakowskiego opracowywany w niniejszej pracy posiada detale, które dzięki wykonanemu pomiarowi skanerem laserowym można było wymodelować w wybranym oprogramowaniu. Porównanie metody fotogrametrycznej z metodą skanowania laserowego dowodzi, że obie mają swoje zalety i wady. Natomiast integracja obu tych metod może dostarczyć więcej bardziej precyzyjnych danych.

Technologia BSP umożliwia nie tylko sporządzenie dokumentacji fotograficznej z poziomu ziemi, ale także z zaplanowanej wcześniej wysokości.

Modele 3D obiektów pozyskane metodami fotogrametrycznymi charakteryzuje wysoka dokładność

i szczegółowość opracowania, w odróżnieniu od modeli tworzonych w ogólnodostępnych i łatwych w obsłudze programach internetowych. Poważnym problemem występującym przy opracowywaniu modelu 3D jest usytuowanie zabytkowych obiektów w zwartej zabudowie, otoczonej bujną roślinnością. W takim przypadku występuje konieczność integracji danych fotogrametrycznych z platformy lotniczej i naziemnej, dodatkowo uzupełnianej innymi źródłami. Takie rozwiązanie zostało zaproponowane w niniejszej publikacji.

4. PODSUMOWANIE

Podsumowując, połączenie profesjonalnego sprzętu pozwala uzyskać trójwymiarowy model bardzo dobrej jakości.

Celem badań było pozyskanie i przetworzenie danych przy tworzeniu modelu 3D obiektu zabytkowego z wyszczególnieniem jego ciekawszych elementów. W toku opracowania zwrócono uwagę na dokładność generowania detali wybranego obiektu w oparciu o integrację zastosowanych danych.

Jakość danych pozyskana z wykorzystaniem skanera różni się od jakości chmury pozyskanej ze zdjęć wykonanych bezzałogowym statkiem powietrznym czy kamerą niemetryczną. Liczba punktów nawiązania znacząco wpływa na proces łączenia dwóch niezależnych chmur punktów. W przypadku tworzenia chmury punktów ważną rolę pełni odpowiednie pokrycie podłużne i poprzeczne zdjęć. Pozyskanie danych z wykorzystaniem technik fotogrametrii oraz skaningu laserowego jest zdecydowanie szybsze od klasycznych metod geodezyjnych. Gęstość chmury punktów ma istotny wpływ na jej wykorzystanie w modelowni 3D.

Tworzenie modelu 3D jest procesem czasochłonnym, istnieją jednak automatyczne sposoby generowania siatki mesh, które mogą przyspieszyć pracę. Dzięki integracji danych wykorzystanych w artykule uzyskano model 3D wybranego obiektu z wszystkimi jego detalami.

Wartość tak pozyskanych danych uwidoczniła przykład pożaru katedry Notre-Dame, gdzie kilka lat przed zniszczeniem wykonano trójwymiarowy model zabytku. Dzięki pozyskanym wtedy danym, łatwiej będzie przeprowadzić proces odbudowy.

W trakcie opracowywania napotkano na problemy związane z jakością zdjęć naziemnych oraz skomplikowaniem licznych szczegółów architektonicznych. Jakość chmury punktów przekłada się wprost proporcjonalnie na możliwość oddania detalu oraz wizualizacji krawędzi obiektu. Bardzo ważna jest również kompletność chmury punktów. W miejscach, gdzie utracona została ostrość, jakość zdjęć oraz w przypadku, gdy wykonano małą ilość fotografii chmura punktów jest niekompletna, a tym samym w efekcie

model 3D. W miejscach, gdzie zdjęcia wykonane są z odpowiednią jakością oraz są odpowiednio kompletne, chmura punktów oraz model są wyraźne i oddają rzeczywistość.

Technika skanowania laserowego i fotogrametrii różnią się znacznie metodą pozyskiwania danych. Metody fotogrametryczne (opracowania jednoobrazowe) są niezawodne, jeśli chodzi o tworzenie fotoplanów o dużej rozdzielczości. Z kolei metoda skanowania laserowego umożliwia prostsze oraz szybsze tworzenie przekrojów pionowych, poziomych oraz rozwinięć powierzchni. Dysponowanie jednocześnie technologią skanowania laserowego i fotogrametrii stwarza prawdopodobnie najlepsze warunki sporządzenia dokumentacji architektonicznej obiektów pod względem dokładności, jakości i kosztów wykonania.

REFERENCES

- Agnello, F., Lo Brutto, M. (2007), 'Integrated surveying techniques in Cultural Heritage documentation', *ISPRS Archives*, XXXVI-5/W47.
- Boehler, W., Marbs, A. (2004), '3D Scanning and Photogrammetry for Heritage Recording: a Comparison', *Geoinformatics: Proceedings of the 12th International Conference of Geoinformatics: Geospatial Information Research: Bridging the Pacific and Atlantic*, 7–9 June, Gavle, Sweden, pp. 291–298.
- Briese, Ch., Pfeifer, N., Haring, A. (2003), 'Laserscanning and photogrammetry for the modeling of the statue Marc Anton', *Proceedings of CIPA Symposium*, 19, Antalya, Turkey, 30 September–04 October.
- Buckley, S.J. et al. (2006), 'Integration of Terrestrial Laser Scanning, Digital Photogrammetry and Geostatistical Methods for High-Resolution Modelling of Geological Outcrops', *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVI, Part B.
- Bujakiewicz, A., Zawieska, D., Kowalczyk, M. (2003), 'Trójwymiarowe modelowanie obiektu architektonicznego', *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Materiały Ogólnopolskiego Sympozjum Geoinformacji „Geoinformacja zintegrowanym narzędziem badań przestrzennych”, Wrocław – Polanica Zdrój, 13, pp. 325–337.
- Drzewiecki, R., Bujakiewicz, A. (2018), 'Ocena dokładności modelu budynku z bardzo gęstej chmury punktów pozyskanej z integracji zdjęć o różnej geometrii', *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 30, pp. 83–93. Available at: <https://doi.org/10.14681/afkit.2018.006> (accessed: 31.12.2023).
- Habib, A. et al. (2004), *3-D Modelling of Historical Sites Using Low-Cost Digital Camera*, XXth ISPRS Congress, Istanbul, Commission 5, SS4-CIPA-Low-Cost Systems in Recording and Managing the Cultural Heritage, Turkey.
- Kędziński, M., Walczykowski, P., Fryśkowska A. (2010), 'Aspekty pozyskiwania danych z Naziemnego Skaningu Laserowego', *BIULETYN WAT*, LIX, 2, pp. 211–221.

- Kowalczyk, M. (2012), 'Badanie przemieszczenia obiektu względem kamery na podstawie analizy obrazów sekwencyjnych', *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 24, pp. 165–175.
- Kwoczyńska, B., Rzepka, A. (2013), 'Zastosowanie kamery niometrycznej do modelowania obiektów małej architektury', *Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich*, 2/II, pp. 31–41.
- Lichti D.D. et al. (2002), 'Comparision of Digital Photogrammetry and Laser Scanning', *Proc. CIPA-ISPRS Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording*, Korfu, Greece, pp. 27–32.
- Markowski, H. (2020), 'Zastosowanie skanowania laserowego 3D w inwentaryzacji budynków zabytkowych', *Builder*, 275(6). Available at: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.1378> (accessed: 31.12.2023).
- Mazur, P., Chojnacki, J. (2017), 'Wykorzystanie dronów do rekonstrukcji wypadków komunikacyjnych', *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*, 18(7–8), pp. 381–384.
- Nowak, E., Nowak, J. (2009), 'Modelowanie 3D na podstawie fotografii amatorskich', *Acta Scientiarum Polonorum. Geodesia et Descriptio Terrarum*, 8, 2, pp. 39–52.
- Plakhotniuk, I., Popko, M., Szymczyk, T (2019), 'Health Aspect of Immersion in VR. Virtual Disease – Fact or Myth?', *INTED2019 Proceedings*, 13th International Technology, Education and Development Conference, 11–13 March, Valencia, Spain, pp. 543–551.
- Remondino, F. et al. (2011), 'UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling – current status and future perspectives', *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-1/C22, pp. 25–31. Available at: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-25-2011> (accessed: 31.12.2023).
- Sauerbier, M., Eisenbeiss, H. (2010), 'UAVs for the dokumentation of archaeological excavations', *International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, part 5, Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK, XXXVIII, pp. 526–531.
- Szymczyk, T. (2018), 'Presentation of the most interesting geographical places using virtual reality technology', *INTED2018 Proceedings*, 12th International Technology, Education and Development Conference, 5–7 March Valencia, Spain, pp. 176–185.
- Szymczyk, T. (2017), 'Make learning more interesting by using virtual reality', *EDULEARN17 Proceedings*, 9th International Conference on Education and New Learning Technologies, Barcelona, Spain, 3–5 July, pp. 3513–3519.
- Szymczyk, T., Skulimowski, S. (2017), 'The use of virtual and agumented reality in the teaching process', *INTED2017 Proceedings*, 11th International Technology, Education and Development Conference, 6–8 March, Valencia, Spain, pp. 6570–6577.
- Tokarczyk, R., Boroń, A. (2000), 'Badanie aparatów fotograficznych dla zastosowań fotogrametrycznych', *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 10, pp. 63-1–63-10.
- Uysal, M., Toprak, A., Polat, N. (2013), 'Photo realistic 3D modeling with UAV: Gedik Ahmet Pasha Mosque in Afyonkarahisar', *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W2, pp. 659–662.
- Vatan, M., Selbesoglu, M.O., Bayram, B. (2009), 'The use of 3D laser scanning technology in preservation of historical structures', *Wiadomości Konserwatorskie*, 26, pp. 659–669.
- Zawieska, D. (2013), 'Automatyczna rekonstrukcja modeli 3D małych obiektów bliskiego zasięgu', *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 25, pp. 295–302.
- Żarnowski, A., Banaszek, A., Banaszek, S. (2015), 'Application of technical measures and software in constructing photorealistic 3D models of historical building using ground-based and aerial (UAV) digital images', *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 99(1), pp. 54–63. Available at: <http://dx.doi.org/10.2478/rgg-2015-0012> (accessed: 31.12.2023).