

Anna Banaś*

orcid.org/0000-0003-4760-4592

Maciej Niedostatkiwicz**

orcid.org/0000-0002-6451-6220

Jacek Bramorski***

orcid.org/0000-0002-5742-9428

Zastosowanie fotogrametrii do tworzenia duplikatów sakralnych zabytków ruchomych – studium przypadku

Application of Photogrammetry in Reproducing Religious Movable Heritage Objects: A Case Study

Słowa kluczowe: fotogrametria, zabytki ruchome, wydruk 3D, duplikaty muzealne, rekonstrukcja, obiekty zabytkowe

Key words: photogrammetry, movable monuments, 3D printing, museum duplicates, reconstruction, historical heritage objects

Wstęp

Zabytkami ruchomymi są najczęściej obiekty muzealne stanowiące element ekspozycji lub wyposażenie obiektów użyteczności publicznej takich jak muzea i galerie sztuki. Mogą nimi być również elementy wyposażenia obiektów sakralnych. Zabytki ruchome niejednokrotnie wymagają usunięcia ze stanowisk ekspozycyjnych ze względu na prace remontowo-naprawcze w obiektach, w których są zgromadzone, przechowywane lub ekspozowane, czy z uwagi na konieczność okresowej konserwacji lub naprawy spowodowanej aktami wandalizmu [Banaś, Niedostatkiwicz 2025; Banaś, Niedostatkiwicz, Bramorski 2025 s. 383–387], a także w związku z działaniami prewencyjnymi polegającymi na ich zabezpieczeniu w obliczu rozwoju sytuacji kryzysowej, w tym konfliktu zbrojnego [Banaś, Niedostatkiwicz, Bramorski 2024]. W takich przypadkach często zachodzi potrzeba tymczasowego zastąpienia oryginalnego obiek-

Introduction

Movable heritage objects often include artefacts that are parts of exhibitions or serve as elements of publicly accessible buildings, such as museums and art galleries. They may also encompass furnishings found in places of worship. These items frequently need to be removed from their displaying sites due to renovation or maintenance works in the buildings where they are stored, exhibited or utilized. Furthermore, they may require periodic conservation or repair due to vandalism [Banaś, Niedostatkiwicz 2025; Banaś, Niedostatkiwicz, Bramorski 2025, pp. 383–387] or as part of preventive measures aimed at protecting them during emerging crises, such as armed conflicts [Banaś, Niedostatkiwicz, Bramorski 2024]. In such situations, temporary replacement of the original object with its duplicate is often necessary, with full recognition that it is only a provisional copy. In recent years, photogram-

* dr inż., Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Konstrukcji Inżynierskich

** dr hab. inż., prof. PG, Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Konstrukcji Inżynierskich

*** ks. prof. dr hab., Akademia im. Stanisława Moniuszki w Gdańsku, Wydział Dyrygentury, Muzyki Kościelnej, Edukacji Artystycznej, Rytmiki i Jazzu, Katedra Muzyki Kościelnej; Parafia pw. Najświętszego Serca Pana Jezusa w Gdyni

* Ph.D. Eng., Gdańsk University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Environment

** D.Sc. Ph.D. University Professor, Gdańsk University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Environment

*** Fr. Prof. D.Sc. Ph.D., Stanisław Moniuszko Academy of Music in Gdańsk, Faculty of Choral Conducting, Church Music, Arts Education, Eurhythmics and Jazz; Parish of the Most Holy Heart of Jesus in Gdańsk

Cytowanie / Citation: Banaś A., Niedostatkiwicz M., Bramorski B. Application of Photogrammetry in Reproducing Religious Movable Heritage Objects: A Case Study. *Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation* 2025, 82:140–155

Otrzymano / Received: 31.01.2025 • **Zaakceptowano / Accepted:** 29.04.2025

doi: 10.48234/WK82PHOTOGRAMMETRY

Praca dopuszczona do druku po recenzjach

Article accepted for publishing after reviews

tu jego duplikatem, przy pełnej świadomości, że jest to jedynie kopia czasowa. W ostatnich latach coraz większe znaczenie w procesie tworzenia duplikatów zabytków ruchomych ma technika fotogrametryczna, która w połączeniu z drukiem 3D umożliwia świadome i precyzyjne odtwarzanie kopii eksponatów muzealnych, w tym replik wyposażenia sakralnego.

Zagadnienie to zostało przedstawione w niniejszym artykule w postaci jego praktycznej aplikacji do stworzenia duplikatu drewnianej płaskorzeźby św. Judy Tadeusza, stanowiącej element wyposażenia sakralnego kościoła pw. Najświętszego Serca Pana Jezusa w Gdyni. W pracy omówiono zalety tej metody oraz jej ograniczenia w odniesieniu do realizacji wydruków 3D.

Przegląd literatury

Zachowanie dziedzictwa kulturowego w obliczu postępujących zagrożeń naturalnych, przemysłowych i społecznych stało się jednym z największych wyzwań współczesnej konserwacji. Zarówno obiekty nieruchome, jak i zabytki ruchome są narażone na procesy degradacji wynikające z działania czynników atmosferycznych, katastrof naturalnych, błędów ludzkich oraz upływu czasu [Miedzińska 2022, s. 25–35]. W odpowiedzi na rosnącą potrzebę ochrony dziedzictwa dynamiczny rozwój technologii cyfrowych w ostatnich dekadach umożliwił nowe formy dokumentacji, analizy i rekonstrukcji historycznych obiektów [Karnicki 2018, s. 107–117; Inzerillo, Di Paola 2017, s. 375–382].

Szczególną rolę w procesie ochrony dziedzictwa odgrywa dziś fotogrametria – technika pomiarowa, która wykorzystując serię zdjęć, pozwala na precyzyjne odtworzenie geometrii obiektów w formie trójwymiarowych modeli [Salagean-Mohora, Anghel, Frigura-Iliasa 2023, s. 1–22]. Wzrost dostępności sprzętu fotograficznego, postęp w algorytmach rekonstrukcji 3D oraz rozwój przystępnych cenowo narzędzi analitycznych sprawiły, że fotogrametria stała się narzędziem powszechnie stosowanym nie tylko w kartografii czy geoinformatyce, ale także w konserwacji zabytków [Kantaros, Ganetsos, Petrescu 2023 s. 1–25; Karnicki 2020, s. 1–13].

Metody cyfrowego odwzorowania zabytków są nieinwazyjne i umożliwiają zachowanie informacji o stanie technicznym obiektów bez ryzyka ich uszkodzenia [Tommasi, Achille 2016, s. 67–74]. W kontekście konserwacji ruchomych zabytków sakralnych, takich jak rzeźby czy płaskorzeźby, techniki te pozwalają na wykonanie wiernych kopii, które mogą pełnić funkcje ekspozycyjne lub zabezpieczające [Suchocki, Okrój, Błaszczak-Bąk 2023, s. 1–8].

W literaturze światowej pojawia się coraz więcej przykładów wykorzystania technologii cyfrowych w procesie dokumentacji i rekonstrukcji dziedzictwa [Calvo-Serrano et al. 2022; Tysiąc et al. 2023, s. 1–14; Zachos, Anagnostopoulos 2023]. W badaniach nad kolekcją drewnianych rzeźb Forma Viva w Kostanjevica na Krki zastosowano fotogrametrię do stworzenia fotorealistycznych modeli, animacji interpretacyjnych oraz replik

metric techniques have become increasingly important in replicating movable objects of heritage. Combined with 3D printing, these techniques provide for precise and deliberate reproduction of museum artefacts, including replicas of religious furnishings.

The article addresses the issue through practical application: the creation of a duplicate wooden bas-relief of St. Jude Thaddeus, which is a part of the religious furnishings in the Church of the Most Sacred Heart of Jesus in Gdynia. The study examines the advantages and limitations of this method in relation to the implementation of 3D printing.

Literature review

The preservation of cultural heritage amidst increasing natural, industrial and social threats has become one of the most significant challenges in contemporary conservation. Both immovable and movable objects of heritage are vulnerable to degradation caused by atmospheric factors, natural disasters, human errors or the passage of time [Miedzińska, 2022, pp. 25–35]. In response to the growing demand for heritage protection, the rapid advancement of digital technologies in recent decades has facilitated new methods for documenting, analyzing and reconstructing historical objects [Karnicki, 2018, pp. 107–117; Inzerillo & Di Paola, 2017, pp. 375–382].

Photogrammetry plays an essential role in contemporary heritage preservation. This measurement technique utilizes a series of photographs to accurately reconstruct the geometry of objects in three-dimensional models [Salagean-Mohora, Anghel, Frigura-Iliasa 2023, pp. 1–22]. The increased accessibility of photographic equipment, advancements in 3D reconstruction algorithms and the availability of affordable analytical tools have led photogrammetry to become a widely adopted method. It is now commonly used not only in cartography and geoinformatics but also in heritage conservation [Kantaros, Ganetsos, Petrescu 2023, pp. 1–25; Karnicki 2020, pp. 1–13].

Digital techniques for documenting objects of heritage are non-invasive, which allows for the preservation of information regarding the technical condition of objects without the risk of damaging them [Tommasi, Achille 2016, pp. 67–74]. In regards to conserving movable sacred artefacts, such as sculptures or bas-reliefs, these methods facilitate the creation of accurate replicas that serve exhibitive or protective purposes [Suchocki, Okrój, Błaszczak-Bąk 2023, pp. 1–8].

An increasing number of studies in the international literature emphasize the use of digital technologies for documentation and reconstruction of heritage objects [Calvo-Serrano et al. 2022; Tysiąc et al. 2023, pp. 1–14; Zachos, Anagnostopoulos 2023]. Research on the collection of wooden sculptures from Forma Viva in Kostanjevica on Krki utilized photogrammetry to create photorealistic models, interpretative animations and jewelry replicas [Učakar et al. 2022, pp. 1–17].

bizuteryjnych [Učakar et al. 2022, s. 1–17]. Podobne podejście przyjęto w pracach nad odtworzeniem rzeźby Wenus z Koła, gdzie technologię skanowania strukturalnego i druku 3D połączono z tradycyjnymi technikami konserwatorskimi [Saha et al. 2022]. Tommasi i Achille [2016] zastosowały fotogrametrię do dokumentacji rzeźb, tworzenia cyfrowych modeli i prowadzenia analiz konserwatorskich. Modele te charakteryzowały się dużą precyzją odwzorowania szczegółów, co pozwoliło na ograniczenie kontaktu z delikatnymi obiektami.

Techniki cyfrowe zostały również wykorzystane w rekonstrukcji elementów dziedzictwa naturalnego, np. w modelu Doliny Pięciu Stawów Polskich, wykonanym z użyciem pełnokolorowego druku 3D [Wabiński, Mościcka 2019, s. 1–16]. Niezwykle ważne są też prace prowadzone w Polsce przy zabytkach architektury takich jak rekonstrukcja wieży sądowej Zamku Królewskiego w Warszawie, gdzie zastosowano integrację danych fotogrametrycznych z różnych etapów badań [Muradov, Gardyński, Markiewicz 2024].

W szczególności podejścia hybrydowe, które obejmują zastosowanie skanowania naziemnego, dronów oraz technologii rzeczywistości mieszanej, umożliwiają cyfrową rekonstrukcję obiektów o złożonej strukturze, takich jak całe zabytkowe budowle sakralne. Tego typu metody integracyjne wspierają wieloaspektowe badania nad stanem technicznym i ochroną dziedzictwa kulturowego, oferując nowe możliwości w zakresie analizy i wizualizacji [Zachos, Anagnostopoulos 2023].

W literaturze pojawiają się także przykłady, w których techniki fotogrametryczne i modelowanie 3D wspomagają odczytywanie zatartych napisów i detali ikonograficznych, tak jak przy dokumentacji chrzcielnicy z kościoła Santiago Apóstol w Montilli [Calvo-Serrano et al. 2022].

Technologie trójwymiarowej dokumentacji i rekonstrukcji przynoszą liczne korzyści: umożliwiają dokładną analizę stanu zachowania, wspomagają procesy decyzyjne dotyczące konserwacji, pozwalają na tworzenie modeli referencyjnych oraz stanowią bezcenną bazę wiedzy dla przyszłych pokoleń [Karnicki 2020; Kantaros, Ganetsos, Petrescu 2023]. Dzięki możliwości wykonania wiernych duplikatów minimalizują ryzyko utraty oryginalnych obiektów w razie uszkodzeń lub katastrof [Saha et al. 2022].

Druk 3D, będący naturalnym uzupełnieniem fotogrametrii, pozwala przekształcać cyfrowe modele w fizyczne repliki. Jeroen De Reu et al. [2013, s. 3116–3127] zastosowali druk 3D do odtworzenia artefaktów archeologicznych i przygotowali repliki używane w celach edukacyjnych i wystawienniczych. Podobnie Miriam Cabrelles et al. [2009, s. 291–299] wykorzystali technologie fotogrametrii i druku 3D do odwzorowania detali architektonicznych historycznych budynków, co umożliwiło ich analizę konserwatorską. Badania Eryka Bunscha i Roberta Sitnika [2014, s. 3–30] podkreślają, że technologie 3D mogą być skutecznym narzędziem do tworzenia cyfrowych archiwów i wizualizacji, wspierając procesy edukacyjne i popularyzacyjne.

A similar approach was employed in the reconstruction of the Venus of Koło sculpture, which combined structured light scanning and 3D printing technologies with traditional conservation techniques [Saha et al. 2022]. Tommasi and Achille [2016] applied photogrammetry to document sculptures, develop digital models and perform conservation analyses. These models exhibited a high degree of detail accuracy, which helped minimize direct contact with the fragile objects.

Digital techniques have been used to reconstruct elements of natural heritage, such as modelling the Valley of Five Polish Ponds through full-color 3D printing [Wabiński, Mościcka, 2019, pp. 1–16]. Projects in Poland focused on architectural heritage, including the reconstruction of the judicial tower at the Royal Castle in Warsaw, where photogrammetric data from various research phases were integrated, are equally important [Muradov, Gardyński, Markiewicz, 2024].

Hybrid approaches that combine terrestrial scanning, drone imaging, and mixed reality technologies enable the digital reconstruction of complex structures, including historical religious buildings. These integrated methods facilitate multidisciplinary research on the technical condition and preservation of cultural heritage, offering new opportunities for analysis and visualization [Zachos, Anagnostopoulos, 2023].

Literature provides further examples where photogrammetric techniques and 3D modelling enhance the interpretation of eroded inscriptions or iconographic details. A notable instance, in this regard, is the documentation of baptismal font from the Church of Santiago Apóstol in Montilla, as demonstrated by Calvo-Serrano et al. [2022].

Three-dimensional documentation and reconstruction technologies provide numerous advantages. They facilitate a detailed analysis of the state of preservation, support decision-making processes related to conservation, enable the creation of reference models and serve as a valuable base of knowledge for future generations [Karnicki 2020; Kantaros, Ganetsos, Petrescu 2023]. Additionally, by allowing for the production of accurate duplicates, these technologies help reduce the risk of losing original objects in case of damage or disaster [Saha et al. 2022].

3D printing serves as a natural complement to photogrammetry, allowing for the transformation of digital models into physical replicas. Jeroen De Reu et al. [2013, pp. 3116–3127] applied 3D printing to reconstruct archaeological artefacts, thus producing replicas for educational and exhibitive purposes. Similarly, Miriam Cabrelles et al. [2009, pp. 291–299] utilized both photogrammetry and 3D printing technologies to replicate architectural details of historical buildings, enhancing their conservation analysis. Additionally, the research by Eryk Bunsch and Robert Sitnik [2014, pp. 3–30] emphasizes that 3D technologies can effectively create digital archives and visualizations, supporting educational initiatives and outreach efforts.

Zagadnienie zastosowania fotogrametrii w dokumentacji oraz rekonstrukcji obiektów dziedzictwa kulturowego jest szeroko omawiane w literaturze przedmiotu. Z kolei w kwestii efektywności kosztowej oraz dostępności metod cyfrowej dokumentacji szczególnie wartościowe są analizy przeprowadzone przez Rafała Karnickiego [2020], który wskazywał na możliwość wykorzystania oprogramowania fotogrametrycznego o otwartym lub tańszym licencjonowaniu do realizacji bardzo dobrej jakości modeli 3D przy ograniczonych nakładach finansowych. W niniejszym opracowaniu przyjęto podobną koncepcję, bazującą na wykorzystaniu dostępnych technologii fotogrametrii bliskiego zasięgu oraz druku 3D, przy czym w odróżnieniu od Karnickiego skoncentrowano się nie tylko na stworzeniu modeli cyfrowych, lecz również na ich praktycznym wykorzystaniu do wykonania fizycznych duplikatów zabytkowych elementów ruchomych. Proces ten wymagał dodatkowych działań związanych z przygotowaniem modeli pod kątem parametrów druku, takich jak zamknięcie siatek trójkątów, odpowiednia optymalizacja rozdzielczości czy dobór materiału drukarskiego zgodnego z wymogami ekspozycyjnymi.

Metoda polegająca na wykonaniu kopii zabytkowych elementów w oparciu o techniki fotogrametrii i druku 3D była już stosowana w kilku ważnych realizacjach konserwatorskich w Polsce. Przykładem może być projekt rekonstrukcji trzech późnogotyckich figur – Matki Boskiej z Dzieciątkiem, św. Barbary oraz św. Bartłomieja – z ołtarza w kościele pw. św. Bartłomieja w Koninie Żagańskim [Klak, Kasztel 2015, s. 73–82]. W tym wypadku proces rekonstrukcji objął zeskanowanie oryginałów oraz przygotowanie kopii eksponowanych w przestrzeni sakralnej, co pozwoliło na zabezpieczenie oryginalnych zabytków przed dalszą degradacją. Podobną technologię zastosowano przy wykonaniu kopii figury Matki Bożej Łokietkowej (tzw. Matki Bożej Uśmiechniętej) z kościoła w Wiślicy [mjk/ mow/ 2016], tworząc dzięki procesowi fotogrametrii bliskiego zasięgu i druku 3D bardzo dobrej jakości replikę średniowiecznego obiektu.

W odniesieniu do przywołanych przykładów realizacja opisana w niniejszym artykule wyróżnia się specyficznym podejściem, wynikającym zarówno z charakteru analizowanego obiektu, jak i przyjętych założeń projektowych. W przeciwieństwie do rekonstrukcji pełnych figur trójwymiarowych, takich jak odtworzone w Koninie Żagańskim czy Wiślicy, niniejsze badania były skoncentrowane na wykonaniu duplikatu płasko-rzeźby św. Judy Tadeusza. Praca z obiektem o niemal płaskiej geometrii stawiała odmienne wymagania, związane przede wszystkim z precyzyjnym odwzorowaniem struktury powierzchni, zachowanych detali artystycznych oraz śladów historycznych uszkodzeń.

W toku realizacji założono minimalizację kosztów wykonania kopii przy jednoczesnym zachowaniu bardzo dobrej jakości odwzorowania. Cel ten osiągnięto dzięki starannie dobranym parametrom rejestracji fotogrametrycznej oraz optymalizacji procesu przygotowania danych do druku 3D, obejmującej m.in. zamykanie siatek modeli i kontrolę rozdzielczości. Do-

The application of photogrammetry in the documentation and reconstruction of cultural heritage objects is extensively discussed in literature. Studies focusing on the cost-effectiveness and accessibility of digital documentation methods are particularly valuable, especially the analyses conducted by Rafał Karnicki [2020], who highlighted the potential of using photogrammetric software with open-source or low-cost licensing to produce high-quality 3D models with limited financial resources. The present study adopts a similar approach, based on the use of accessible close-range photogrammetry technologies and 3D printing. However, in contrast to Karnicki's work, the focus here is not only on generating digital models but also on their practical application in producing physical duplicates of movable objects of heritage. This process required additional steps to prepare the models for printing, such as closing triangle meshes, optimizing resolution appropriately and selecting printing materials compatible with exhibitive requirements.

The method of producing replicas of heritage objects using photogrammetry and 3D printing techniques has already been applied in several significant conservation projects in Poland. One such example is the reconstruction project of three late-Gothic figures—the Virgin Mary with Child, St. Barbara, and St. Bartholomew—from the altar of St. Bartholomew's Church in Konin Żagański [Klak, Kasztel 2015, pp. 73–82]. In this case, the reconstruction process involved scanning the original sculptures and preparing replicas for display within the religious space, thereby allowing the original artefacts to be secured against further degradation. A similar approach was employed in creating a replica of the figure of Our Lady of Łokietek (also known as the Smiling Madonna) from the church in Wiślica [mjk/ mow/ 2016]. Through the use of close-range photogrammetry and 3D printing, a high-quality replica of the medieval artefact was produced.

With regards to the aforementioned examples, the project described in this article is distinguished by a specific approach resulting from both the nature of the analyzed object and the adopted design assumptions. In contrast to the reconstruction of fully three-dimensional figures, such as those recreated in Konin Żagański or Wiślica—the present study focused on the duplication of a bas-relief of St. Jude Thaddeus. Working with an object of nearly flat geometry posed different requirements, primarily related to the precise reproduction of the surface structure, preserved artistic details and traces of historical damage.

During the implementation of the project, high efforts were made to minimize the cost of producing the replica while maintaining a high level of detail and accuracy. This objective was achieved through carefully selected photogrammetric recording parameters and optimization of the data preparation process for 3D printing, including mesh closure and resolution control. An additional benefit of the project was the preparation of digital files in a format suitable for archiving, as well as

datkową wartością projektu było przygotowanie plików cyfrowych w sposób umożliwiający ich archiwizację oraz wykorzystanie modeli do celów zarówno ekspozycyjnych, jak i dydaktycznych, co wpisuje się w obecną tendencję w ochronie dziedzictwa ruchomego.

Technika fotogrametrii

Podstawy teoretyczne fotogrametrii

Fotogrametria to dziedzina, która łączy naukę i technikę, pozwalając na odkrywanie i dokumentowanie świata w trójwymiarze za pomocą fotografii. W swojej istocie bazuje na zasadzie triangulacji – procesie, w którym co najmniej dwa obrazy tego samego obiektu, wykonane z różnych punktów widzenia, umożliwiają dokładne odtworzenie jego przestrzennej geometrii. Dzięki temu fotogrametria staje się potężnym narzędziem dla konserwatorów sztuki i zabytków, umożliwiając tworzenie dla historycznych obiektów ich cyfrowych modeli, które są nie tylko precyzyjne, ale także w pełni zarchiwizowane w przestrzeni trójwymiarowej.

W praktyce oznacza to, że za pomocą odpowiednio wykonanych zdjęć, czy to z dronów, czy z aparatów cyfrowych, można stworzyć wierny model rzeźby, fresku bądź budowli. Proces ten obejmuje takie etapy, jak wykonanie fotografii, kalibracja kamer, identyfikacja wspólnych punktów na zdjęciach oraz generowanie finalnego modelu. Główną rolę odgrywają tutaj specjalistyczne wzory matematyczne, które pozwalają na przekształcenie dwuwymiarowych obrazów w trójwymiarowe struktury. Współczesne oprogramowanie oraz zaawansowane algorytmy znacznie upraszczają ten proces, czyniąc go bardziej dostępnym.

Różnorodność metod stosowanych w fotogrametrii, takich jak metoda DLT, wyrównanie wiązek czy samokalibracja, pozwala na dostosowanie techniki do specyficznych potrzeb konserwatorskich. Dzięki nim można nie tylko dokładnie odwzorować obiekt, ale również uwzględnić drobne nieregularności, które często są ważne dla zrozumienia jego historii i wartości artystycznej. Fotogrametria nie tylko pomaga zachować dziedzictwo kulturowe, ale także otwiera nowe możliwości badawcze i dokumentacyjne w pracy konserwatora.

Wady i zalety techniki fotogrametrii

Fotogrametria to uznana i dynamicznie rozwijająca się technologia, która zyskała szczególne znaczenie w dokumentacji i ochronie dziedzictwa kulturowego oraz w inżynierii lądowej. Dzięki swojej precyzji, nieinwazyjności i możliwości elastycznego zastosowania jest nieocenionym narzędziem w procesach dokumentowania i rekonstrukcji obiektów – od imponujących budowli po drobne artefakty muzealne. Umożliwia tworzenie trójwymiarowych modeli, które wiernie odwzorowują zarówno kształt, jak i strukturę zabytków, pozwalając uchwycić ich najdrobniejsze detale. Co więcej, fotogrametria z powodzeniem integruje się z innymi nowoczesnymi technologiami, takimi jak druk 3D, otwierając nowe możliwości w zakresie konserwacji, edukacji i popularyzacji dziedzictwa.

for the use of the models in both exhibitivite and educational contexts, thus aligning with current trends in the preservation of movable objects of heritage.

Photogrammetry

Theoretical foundations of photogrammetry

Photogrammetry is a field that bridges science and technology, enabling for the exploration and documentation of the world in three dimensions through photography. At its core lies the principle of triangulation—a process in which at least two images of the same object, taken from different viewpoints, allow for an accurate reconstruction of its spatial geometry. As a result, photogrammetry has become a powerful tool for art and heritage conservators, allowing for the creation of digital models of historical objects that are precise and thoroughly archived in three-dimensional space.

In practice, this means that with the use of appropriately captured photographs—whether taken by drones or digital cameras—it is possible to create an accurate model of a sculpture, a fresco or a building. The process involves several stages, including image acquisition, camera calibration, identification of common points in the photographs and the generation of the final model. Specialized mathematical formulas play a central role in conducting the transformation of two-dimensional images into three-dimensional structures. Modern software and advanced algorithms have greatly simplified this process, making it more accessible.

The variety of methods used in photogrammetry—such as the Direct Linear Transformation (DLT) method, bundle adjustment or self-calibration—allows the technique to be tailored to the specific needs of conservation work. These methods make it possible not only to reproduce an object accurately but also to capture minor irregularities, which are often crucial for understanding its history and artistic value. Photogrammetry not only supports the preservation of cultural heritage but also opens up new research and documentation possibilities in the work of conservators.

Advantages and limitations of photogrammetry

Photogrammetry is a well-established and rapidly evolving technology that has gained particular importance in the documentation and preservation of cultural heritage, as well as in civil engineering. Owing to its precision, non-invasiveness, and flexible applicability, it serves as an invaluable tool in the processes of documenting and reconstructing objects, ranging from monumental structures to minor museum artefacts. It enables the creation of three-dimensional models that faithfully reproduce the shape and surface structure of heritage objects, capturing even their finest details. Moreover, photogrammetry integrates effectively with other advanced technologies, such as 3D printing, thus



Ryc. 1. Kościół pw. Najświętszego Serca Pana Jezusa w Gdyni, 2021; fot. archiwum parafii

Fig. 1. Church of the Most Sacred Heart of Jesus in Gdynia, 2021; photo from the parish archive

W swojej istocie fotogrametria jest metodą bezdotykową, co czyni ją idealną do pracy z delikatnymi obiektami i zabytkami wymagającymi szczególnej troski. Dzięki wykorzystaniu dronów można dokumentować trudno dostępne miejsca, takie jak detale fasad gotyckich katedr czy fragmenty mostów, które byłyby niemożliwe do uchwycenia tradycyjnymi metodami. Skalowalność tej technologii, opisana w badaniach Tommasi i Achille [2016], sprawia, że fotogrametria znajduje zastosowanie zarówno w projektach o dużym budżecie, jak i w mniejszych inicjatywach lokalnych.

Jednakże, jak każda technologia, fotogrametria ma swoje ograniczenia. Dokładność pomiarów w dużej mierze zależy od jakości zdjęć oraz warunków oświetleniowych, co może stanowić wyzwanie podczas pracy w trudnych warunkach atmosferycznych czy w wypadku obiektów o nietypowej powierzchni, takiej jak szkło czy metal [Hellwich 2017]. Wymagana jest również kalibracja sprzętu, co zwiększa złożoność procesu [Hellwich 2017]. Kolejne wyzwanie stanowi przetwarzanie dużych ilości danych, co wymaga zaawansowanego oprogramowania i odpowiedniej infrastruktury obliczeniowej [Hellwich 2017].

Pomimo tych ograniczeń rozwój technologii sprawia, że fotogrametria staje się coraz bardziej precyzyjna i dostępna. Automatyzacja procesów oraz ciągłe udoskonalanie algorytmów przetwarzania obrazów [Hellwich 2017] pozwalają na przezwyciężanie wielu barier technicznych, otwierając nowe możliwości w dokumentowaniu i zachowywaniu dziedzictwa kultury.

opening new opportunities in conservation, education and heritage dissemination.

At its core, photogrammetry is a non-contact method, making it ideal for working with delicate objects and items of heritage that require special care. With the use of drones, it is possible to document hard-to-reach areas, such as details of Gothic cathedral facades or parts of bridges that would be inaccessible using traditional methods. The scalability of this technology, as described in the research by Tommasi and Achille [2016], enables for its application in both large-scale, well-funded projects and smaller local initiatives.

However, as with any technology, photogrammetry has its limitations. Measurement accuracy largely depends on the quality of the photographs and lighting conditions, which can be challenging when working in difficult weather conditions or with objects that have unusual surface properties, such as glass or metal [Hellwich 2017]. Moreover, equipment calibration is required, which adds complexity to the process [Hellwich 2017]. Another challenge involves processing large volumes of data, which demands advanced software and adequate computational infrastructure [Hellwich 2017].

Despite these limitations, technological advancements are making photogrammetry increasingly precise and accessible. Process automation and continuous improvement of image processing algorithms [Hellwich 2017] help overcome many technical barriers, thus opening new possibilities for documenting and preserving cultural heritage.

Kościół pw. Najświętszego Serca Pana Jezusa w Gdyni

Kościół pw. Najświętszego Serca Pana Jezusa (ryc. 1) jest jednym z najbardziej znanych obiektów sakralnych na terenie Gdyni. Prace projektowe związane z jego realizacją rozpoczęły się w roku 1956 [Bramorski 2024, s. 3, 82–89]. Świątynia została zaprojektowana jako trójnawowa, ze środkową bryłą główną przykrytą dachem pochyłym, którego konstrukcję stanowi ruszt żelbetowy oraz dwie nawy boczne. Nad prezbiterium znalazła się wieża, tzw. latarnia. Budynek przewidziano jako całkowicie podpiwniczony, znaczą część przyziemia stanowią pomieszczenia tzw. kościoła dolnego, zaś część nadziemną – kościół górny (główny). Autorami projektu architektonicznego byli prof. arch. Jan Borowski i prof. dr inż. arch. Leopold Taraszkiewicz. Roboty budowlane rozpoczęto w 1957 r. Pierwszy etap budowy, czyli kościół dolny, ukończono w stanie surowym w roku 1959, a stan surowy kościoła górnego zrealizowano w roku 1961. Przez następne lata trwały prace wykończeniowe, obejmujące roboty tynkarskie, montaż organów oraz budowę ołtarza. Kościół został konsekrowany 31 października 1966 r. w ramach obchodów 1000-lecia chrześcijaństwa w Polsce. Po tym roku roboty budowlane były kontynuowane, m.in. wykonano elewacje zewnętrzne. W 1972 r. powstały mozaiki na ścianach prezbiterium oraz przystąpiono do budowy chóru. Wznoszenie żelbetowej wieży dzwonnicy (kampanili) rozpoczęto w 1973, a zakończono w 1981 r. Obecnie Zespół Sakralny parafii pw. Najświętszego Serca Pana Jezusa w Gdyni składa się z następujących obiektów: budynku kościoła wraz z zapleczem, budynku plebanii oraz wieży dzwonnicy.

Postać św. Judy Tadeusza

Zgodnie z przekazami biblijnymi Juda Tadeusz Apostoł (ryc. 2b–d), zwany również Judą, był bratem Jakuba Apostoła [Święty Tadeusz Juda 2020]. Czasami nazywa się go Judą Jakubowym. Był on jednym z dwunastu apostołów (ryc. 2a). Zaliczany do grona męczenników, jest świętym Kościoła zarówno katolickiego, jak i prawosławnego. Juda Apostoł to patron spraw trudnych i beznadziejnych.

W ikonografii zachodniej przedstawiany jest na pamiątkę swojej śmierci z pałąk lub włócznią w ręku, w czerwonej szacie lub w brązowo-czarnym płaszczu z obrazem ukazującym Jezusa. Atrybuty św. Judy Tadeusza to: kamienie, krzyż, księga, laska, łódź rybaka, maczuga, miecz, pałki i topór. W sztuce wschodniej, na ikonach, Juda Apostoł nosi długie czerwone szaty, ma długie ciemne włosy i krótką przyprószoną siwizną brodę. Na większości ikonografii w dłoni, lub obu dłoniach, trzyma zwinięty lub rozwinięty zwój papierowy.

Church of the Most Sacred Heart of Jesus in Gdynia

The Church of the Most Sacred Heart of Jesus (Fig. 1) is one of Gdynia's most prominent religious buildings. The design work related to its construction began in 1956 [Bramorski 2024, pp. 3, 82–89]. The church was designed as a three-aisled structure, with a central main nave covered by a sloped roof supported by a reinforced concrete grid flanked by two side aisles. A tower, commonly referred to as the lantern, stands above the presbytery. The building was designed with a full basement, with a significant portion of ground level housing the so-called lower church, while the above-ground section serves as the main (upper) church.

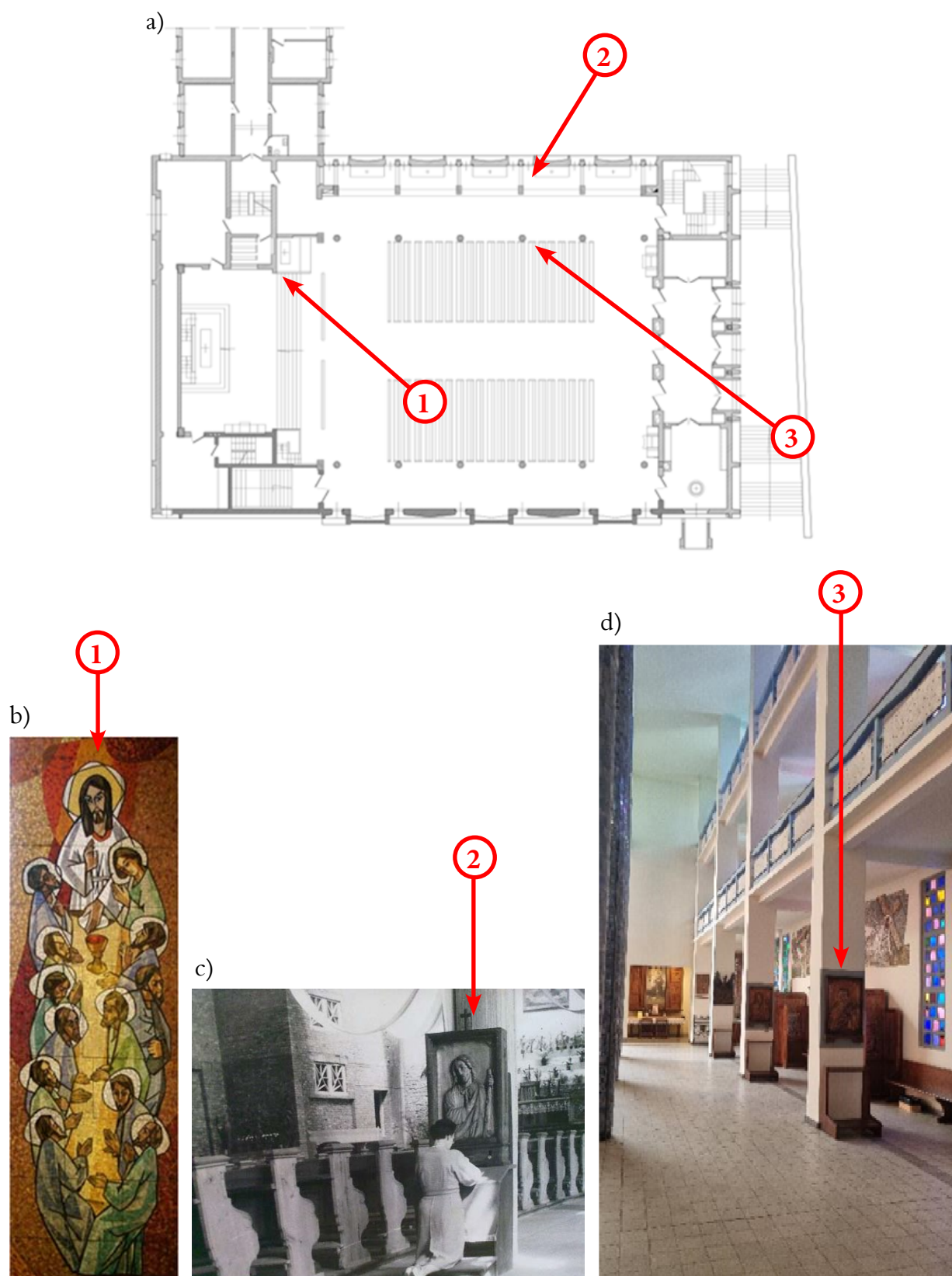
The architectural design was developed by Professor Jan Borowski and Professor Leopold Taraszkiewicz. Its construction began in 1957. The first phase, comprising the lower church, was completed in shell form in 1959, followed by the upper church structure in 1961. In the subsequent years, finishing works were carried out, which included plastering, the installation of pipe organ, and the construction of altar. The church was consecrated on October 31, 1966, the event being a part of celebrating the millennium of Christianity in Poland.

The construction work continued beyond that year and included completing the external façades. In 1972, mosaics were created on the presbytery's walls and the construction of choir stand began. The erection of a reinforced concrete bell tower (campanile) began in 1973 and was completed in 1981. Today, the Religious Complex of the Parish of the Most Sacred Heart of Jesus in Gdynia comprises the church building with its facilities, a parish hall and the bell tower.

The figure of St. Jude Thaddeus

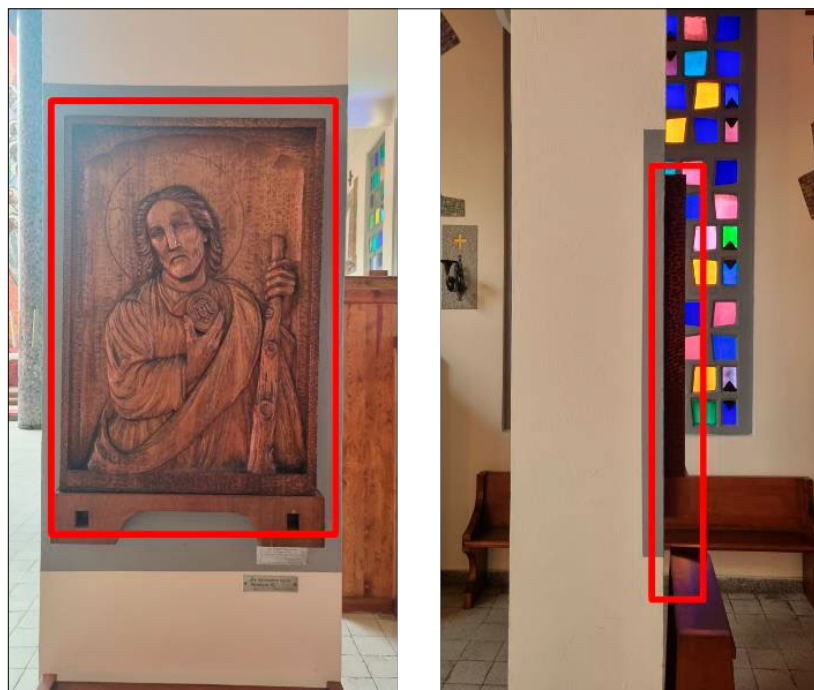
According to the biblical accounts, Jude Thaddeus the Apostle (Fig. 2b–d)—also known simply as Jude—was the brother of James the Apostle [Święty Tadeusz Juda 2020]. He is sometimes referred to as Jude, brother of James. He was one of the twelve apostles (Fig. 2a). Recognized as a martyr, he is venerated as a saint in both the Catholic and Orthodox Churches. St. Jude is regarded as the patron of difficult and hopeless causes.

In Western iconography, he is typically depicted holding a club or spear—symbols of his martyrdom—dressed in a red robe or a brown-and-black mantle with an image of Jesus. His attributes may include stones, a cross, a book, a staff, a fishing boat, a cudgel, a sword, clubs or an axe. In Eastern Christian art, particularly in icons, St. Jude the Apostle is shown wearing long red robes, with long dark hair and a short greying beard. In most iconographic depictions, he holds a rolled or unrolled scroll in one or both hands.



Ryc. 2. Postać św. Judy Tadeusza w kościele pw. Najświętszego Serca Pana Jezusa w Gdyni: a) plan sytuacyjny tzw. górnego kościoła, archiwum parafii; b) ceramiczna mozaika na ścianie po prawej stronie prezbiterium, nad tabernakulum, drewniana płaskorzeźba, 2024 (1); c) na słupie pomiędzy nawą główną a prawą nawą boczną – lokalizacja pierwotna, [b.r.] (2); d) na słupie galerii balkonowej prawej nawy bocznej, 2024 (3); fot. M. Niedostatkiwcz (2b, d), archiwum parafii (2b)

Fig. 2. The representation of St. Jude Thaddeus in the Church of the Most Sacred Heart of Jesus in Gdynia: a) site plan of the so-called upper church, from the parish archive; b) ceramic mosaic on the wall to the right of the presbytery, above the tabernacle, wooden bas-relief, 2024 (1); c) on the pillar between the main nave and the right side aisle – original location, [undated] (2); d) on the pillar of the balcony gallery of the right side aisle, 2024 (3); photo by M. Niedostatkiwcz (2b, d); photo from the parish archive (2b)



Ryc. 3. Drewniana płaskorzeźba św. Judy Tadeusza – umiejscowienie na słupie, widok: a) z przodu, b) z boku, 2024; fot. A. Banaś

Fig. 3. Wooden bas-relief of St. Jude Thaddeus—placement on the pillar, view: a) front, b) side, 2024; photo by A. Banaś

Zastosowanie fotogrametrii do tworzenia duplikatu sakralnego zabytku ruchomego

Stanowisko badawcze

Proces tworzenia cyfrowego modelu płaskorzeźby św. Judy Tadeusza o wymiarach $61 \times 96,5$ cm obejmował wiele starannie zaplanowanych etapów, które miały na celu zapewnienie dużej precyzji odwzorowania obiektu. Do najważniejszych kroków należało przygotowanie miejsca pracy, dobór parametrów aparatu, wykonanie zdjęć oraz analiza i przetwarzanie danych fotograficznych.

Pierwszym etapem było stworzenie odpowiednich warunków oświetleniowych wokół płaskorzeźby, znajdującej się w kościele o słabym naturalnym oświetleniu, poniżej 300 lumenów (ryc. 2d, 3). Aby zminimalizować zakłócenia wynikające z cieni i refleksów, zastosowano dodatkowe źródło światła – halogen LED o strumieniu 2000 lumenów. Oświetlenie ustawiono tak, by równomiernie rozświetlić detale płaskorzeźby, unikając nadmiernych kontrastów.

Do realizacji dokumentacji wybrano aparat znajdujący się w powszechnie używanym smartfonie iPhone 14, wyposażony w 48-megapikselowy sensor i przysłonę $f/1,78$. Wybór tego urządzenia miał na celu podkreślenie uniwersalności i dostępności procesu fotogrametrycznego – wykorzystanie ogólnodostępnego sprzętu pozwala bowiem na przeprowadzanie dokumentacji w różnych warunkach, bez konieczności stosowania drogiego, specjalistycznego wyposażenia.

W celu uzyskania jak najlepszej jakości zdjęć ustawiono czułość ISO na poziomie 100–200, aby zminimalizować szum cyfrowy. Balans bieli został ręcznie dopasowany

Application of photogrammetry in creating a duplicate of a movable religious artefact

Experimental setup

The process of creating a digital model of the bas-relief of St. Jude Thaddeus, measuring 61.0×96.5 cm, involved a series of carefully planned steps aimed at achieving high precision in reproducing the object. The key stages included preparing the working environment, selecting camera parameters, acquiring images, analyzing and processing photographic data.

The first step was to create appropriate lighting conditions around the bas-relief, as it is located in a church with low natural illumination, below 300 lumens (Fig. 2d, 3). To minimize visual interference caused by shadows and reflections, an additional light source was used—a 2000-lumen LED halogen lamp. The lighting was positioned in such a way so as to illuminate the bas-relief details evenly while avoiding excessive contrast.

A widely available smartphone camera, specifically the iPhone 14's, was selected for the documentation process. The device is equipped with a 48 mpx sensor and an $f/1.78$ aperture. The choice of this equipment was intended to emphasize the universality and accessibility of the photogrammetric process: the use of commonly available hardware enables for the documentation to be carried out in various conditions without the need for expensive specialized equipment.

The ISO sensitivity was set between 100 and 200 to achieve the highest possible image quality and min-



Ryc. 4. Płaskorzeźba św. Judy Tadeusza uchwycona z różnych perspektyw – zastosowanie wzajemnego nachodzenia na poziomie 60–80% zapewnia dużą liczbę punktów wspólnych umożliwiających precyzyjne odwzorowanie geometrii obiektu w modelu 3D; fot. A. Banaś

Fig. 4. The bas-relief of St. Jude Thaddeus captured from various perspectives – an overlap rate of 60–80% ensures a high number of common points, providing accurate reconstruction of the object's geometry in a 3D model; photo: A. Banaś

do temperatury światła sztucznego halogenu LED. Zrezygnowano z użycia statywu, wykorzystując wbudowaną stabilizację obrazu oferowaną przez aparat smartfona.

Przy wykonywaniu dokumentacji wykorzystano technikę wielokrotnego fotografowania pod różnymi kątami, co pozwoliło na zebranie kompleksowego zestawu zdjęć niezbędnych do dokładnego odwzorowania geometrii płaskorzeźby (ryc. 4). Wykonano łącznie 212 zdjęć, przestrzegając następujących zasad:

- odległość od obiektu: zdjęcia wykonywano z odległości 0,5–1 m dla uchwycenia szczegółów oraz z odległości 2–3 m dla pełnego kadru płaskorzeźby,
- nakrzyżowanie ujęć: każde zdjęcie pokrywało się w 60–80% z sąsiednimi kadrami, co zapewniało odpowiednią liczbę punktów charakterystycznych do dalszej analizy i budowy modelu 3D.

Rekonstrukcja obrazu

Po zebraniu zdjęć przystąpiono do ich przetwarzania w programie Agisoft Metashape, który umożliwia rekonstrukcję cyfrowych modeli 3D na podstawie zdjęć wykonanych pod różnymi kątami. Na początku zdjęcia zostały zaimportowane do oprogramowania i poddane wstępnej selekcji w celu usunięcia potencjalnie nieostrych lub rozmytych ujęć, ponieważ jednak wszystkie fotografie spełniały wymagania jakościowe, wszystkie też zostały wykorzystane w dalszym procesie. Następnie program automatycznie wyrównał zdjęcia, identyfikując punkty charakterystyczne na ich powierzchniach, co pozwoliło na wygenerowanie wstępnej chmury punktów reprezentującej strukturę płaskorzeźby (ryc. 5).

W kolejnych etapach przystąpiono do tworzenia gęstej chmury punktów, która szczegółowo odwzorowywała drobne detale powierzchni obiektu (ryc. 6). Z tej gęstej chmury utworzono siatkę 3D, stanowiącą dokładne odwzorowanie geometrii płaskorzeźby. Ostatnim krokiem było nałożenie tekstur uzyskanych z oryginalnych zdjęć na model 3D. Dzięki temu nie tylko precyzyjnie odwzorował on kształt i strukturę płaskorzeźby, ale również jej powierzchnię, detale faktury oraz kolory, co zapewniło wiernie odwzorowanie rzeczywistego wyglądu obiektu.

W efekcie stworzono cyfrowy model 3D płaskorzeźby św. Judy Tadeusza, który stanowi precyzyjną dokumentację dzieła i może być wykorzystywany do

minimize digital noise. White balance was manually adjusted to match the color temperature of the artificial LED halogen light. A tripod was not used; instead, the smartphone's built-in image stabilization system was utilized.

The documentation process employed the technique of multiple-angle photography, which made it possible to collect a comprehensive set of images necessary for accurate reproduction of the bas-relief geometry (Fig. 4). A total of 212 photographs were taken, following these principles:

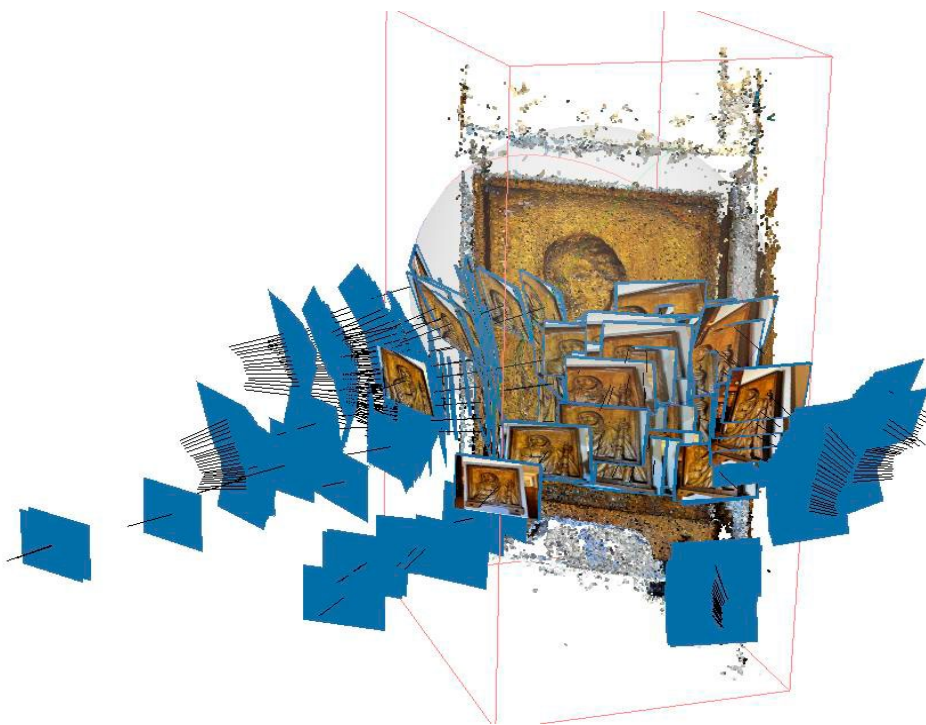
- Distance from the object: photographs were taken from a distance of 0.5–1 m to capture fine details and from 2–3 m to frame the entire bas-relief;
- Image overlap: each photograph overlapped by 60–80% with adjacent images, ensuring a sufficient number of key points for further analysis and 3D model construction.

Image reconstruction

After capturing the photographs, the next step involved processing them using Agisoft Metashape, a software tool that allows for the reconstruction of digital 3D models from images taken at various angles. Initially, the images were imported into the software and subjected to preliminary selection to eliminate potentially blurred or out-of-focus shots. However, since all photographs met the required quality standards, all were used in the subsequent processing stages.

The software then automatically aligned the images by identifying key feature points on their surfaces, allowing for the generation of an initial point cloud representing the structure of the bas-relief (Fig. 5).

In the subsequent stages, a dense point cloud was generated, accurately capturing the fine surface details of the object (Fig. 6). From this dense point cloud, a 3D mesh was created, providing an accurate representation of the bas-relief geometry. The final step involved applying textures derived from the original photographs onto the 3D model. As a result, the model precisely reproduced not only the shape and structure of the bas-relief but also its surface



Ryc. 5. Etap wyrównania zdjęć w procesie tworzenia duplikatu – identyfikacja wzajemnego położenia kamer; fot. A. Banaś

Fig. 5. Image alignment stage in the replica creation process – identification of relative camera positions; photo by A. Banaś

celów zarówno konserwatorskich, jak i edukacyjnych (ryc. 7). Taki proces ukazuje potencjał fotogrametrii jako skutecznej i uniwersalnej metody w dokumentowaniu dziedzictwa kulturowego.

Wydruk 3D płaskorzeźby

Druk 3D znajduje szerokie zastosowanie w nauce i przemyśle dzięki możliwości precyzyjnego odwzorowania skomplikowanych geometrii oraz ekonomiczności procesu produkcji. W celu stworzenia replik płaskorzeźby św. Judy Tadeusza wykorzystano drukarkę 3D Prusa MK4, charakteryzującą się obszarem roboczym $25 \times 21 \times 22$ cm. W celach testowych zrealizowano dwa modele płaskorzeźby: małą replikę o wymiarach $7,5 \times 12,5$ cm oraz większą o wymiarach $18,5 \times 31$ cm. Ze względów ekonomicznych oraz z uwagi na czasochłonność procesu zrezygnowano z wykonania repliki w skali 1:1.

Użyta w badaniach drukarka jest wyposażona w ekstruder z dyszą o średnicy 0,4 mm oraz system automatycznej kalibracji, zapewnia dużą dokładność i minimalizuje błędy podczas druku. W pracy zastosowano biodegradowalny filament PLA (kwas polimlekowy), który charakteryzuje się niską temperaturą topnienia ($180\text{--}220^\circ\text{C}$), stabilnością wymiarową oraz dobrą jakością powierzchni wydruków. Dzięki ekologicznej charakterystyce materiału realizacja projektu wpisuje się w trendy zrównoważonego rozwoju.

Obydwa modele wydrukowano, stosując wypełnienie na poziomie 15%, co zapewniało odpowiednią trwałość, redukując jednocześnie zużycie materiału i czas druku. Wypełnienie 15% odnosi się do wewnątrz-

characteristics, texture details and colors, offering a highly accurate visual representation of the actual object.

The outcome was a digital 3D model of the bas-relief of St. Jude Thaddeus, which serves as a precise record of the artwork and can be used both for conservation and educational purposes (Fig. 7). This process demonstrates the potential of photogrammetry as an effective and versatile method for documenting cultural heritage.

3D printing of the bas-relief

3D printing is widely used in science and industry due to its ability to precisely reproduce complex geometries and the cost-effectiveness of the production process. To create replicas of the bas-relief of St. Jude Thaddeus, a Prusa MK4 3D printer was used, featuring a build volume of $25 \times 21 \times 22$ cm. For testing purposes, two versions of the bas-relief were produced: a miniature replica measuring 7.5×12.5 cm and a larger one measuring 18.5×31 cm. Due to economic considerations and the time-consuming nature of the process, a full-scale 1:1 replica was not produced.

The Prusa MK4 printer used in this study is equipped with a 0.4 mm nozzle extruder and an automatic calibration system offering high precision and minimizing printing errors. The prints were made using biodegradable PLA (polylactic acid) filament, which is characterized by a low melting point ($180\text{--}220^\circ\text{C}$), dimensional stability and good surface quality. Thanks to the environmentally friendly nature of the



Ryc. 6. Identyfikacja punktów charakterystycznych i budowa wstępnej chmury punktów, fot. A. Banaś
 Fig. 6. Identification of key points and generation of the initial point cloud; photo by A. Banaś



Ryc. 7. Model 3D drewnianej płaskorzeźby św. Judy Tadeusza wraz z detalami po teksturowaniu – wierne odwzorowanie kształtu, szczegółów i faktury powierzchni; fot. A. Banaś
 Fig. 7. The 3D model of the wooden bas-relief of St. Jude Thaddeus with textured details – accurate representation of shape, surface details and texture; photo by A. Banaś

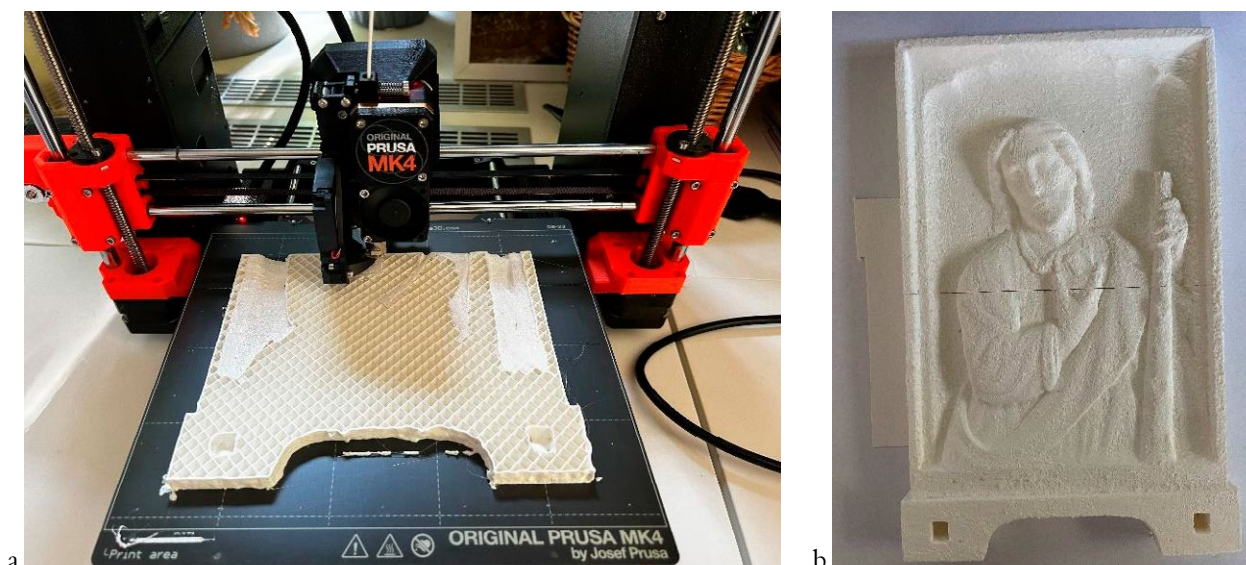
nej struktury modelu, gdzie 85% przestrzeni stanowi kratownica (ryc. 8a). Takie rozwiązanie gwarantuje stabilność mechaniczną przy jednoczesnym ograniczeniu masy oraz kosztów produkcji.

Mała replika płaskorzeźby została wydrukowana w czasie 1 godz. i 43 min, zużywając 30,58 g filamentu (10,26 m filamentu o średnicy 0,4 mm). Koszt wydruku wyniósł jedynie 2,53 zł. Z kolei wydruk większej repliki, ze względu na jej wymiary, wykonano w dwóch fragmentach (ryc. 8b). Łączny czas druku wyniósł 13 godz. i 9 min, zużyto 280,14 g filamentu (93,93 m), a koszt produkcji wyniósł 10,19 zł.

material, the project aligns with current trends in sustainable development.

Both models were printed with a 15% infill, which ensured sufficient durability while reducing material consumption and printing time. The 15% infill refers to the internal structure of the model, where 85% of the volume consists of a internal lattice (Fig. 8a). This solution provides mechanical stability while minimizing weight and production costs.

The miniature replica of the bas-relief was printed in 1 hour and 43 minutes using 30.58 g of filament (10.26 m of 0.4 mm diameter filament). The printing cost was only



Ryc. 8. Duża replika płaskorzeźby św. Judy Tadeusza: a) struktura wewnętrzna fragmentu płaskorzeźby z kratownicowym wypełnieniem podczas druku, b) produkt finalny – gotowa płaskorzeźba złożona z dwóch połączonych z sobą elementów; fot. A. Banaś

Fig. 8. Large replica of the bas-relief of St. Jude Thaddeus: a) internal structure of the bas-relief fragment with lattice infill during printing, b) final product – completed bas-relief composed of two joined segments; photo by A. Banaś

Analiza procesu wykazała, że druk 3D na drukarce Prusa MK4 jest skutecznym, ekonomicznym i wszechstronnym rozwiązaniem do tworzenia modeli 3D różnej wielkości. Filament PLA zapewnił dobrą jakość detali i gładkość powierzchni, co jest szczególnie ważne w reprodukcji obiektów artystycznych takich jak płaskorzeźby. Przy umiarkowanym wypełnieniu (15%) uzyskano odpowiednią wytrzymałość i stabilność strukturalną modeli, a jednocześnie zoptymalizowano czas i koszty produkcji, co dowodzi potencjału tej technologii w zastosowaniach artystycznych i konserwatorskich.

Analiza wyników rekonstrukcji obrazu

Wykonana analiza fotogrametryczna płaskorzeźby św. Judy Tadeusza pokazała, jak ważne są odpowiednie parametry zdjęć oraz liczba wykonanych fotografii dla uzyskania dokładnego i szczegółowego modelu 3D. Zidentyfikowano kilka głównych czynników, które wpływają na jakość i precyzję modelu, a także na występowanie błędów takich jak deformacje i zniekształcenia.

Przeprowadzona analiza wykazała, że przy zbyt małej liczbie zdjęć model 3D jest obciążony licznymi błędami geometrycznymi, które mogą skutkować nienaturalnymi zniekształceniami obiektu (ryc. 9). Niewystarczająca liczba zdjęć powoduje, że program nie jest w stanie uzyskać wystarczającej liczby punktów wspólnych, co utrudnia precyzyjne odwzorowanie geometrii obiektu. Przykładowo, w modelu płaskorzeźby zauważono efekty tzw. naciągnięcia lub rozciągnięcia niektórych fragmentów, co było bezpośrednim skutkiem niedostatecznej liczby ujęć i zbyt małego nakładania się kadrów. Dla analizowanego przypadku minimalna liczba zdjęć umożliwiająca rekonstrukcję płaskorzeźby została oszacowana na 100 szt.

Zastosowanie optymalnego nakładania się zdjęć na poziomie 60–80% minimalizuje opisane błędy, zapew-

nił PLN 2.53 (0.6 EURO). Due to its dimensions, the larger replica was printed in two separate parts (Fig. 8b). The total printing time amounted to 13 hours and 9 minutes, with 280.14 grams of filament used (93.93 meters) and the total production cost was PLN 10.19 (2.3 EURO).

An analysis of the process demonstrated that 3D printing using the Prusa MK4 is a practical, economical and versatile solution for creating 3D models of various sizes. The PLA filament provided good detail quality and surface smoothness, both particularly important when reproducing artistic objects such as bas-reliefs. With a moderate infill of 15%, sufficient strength and structural stability were achieved while simultaneously optimizing production time and cost—confirming the potential of this technology in artistic and conservation applications.

Analysis of image reconstruction results

The photogrammetric analysis of the bas-relief of St. Jude Thaddeus demonstrated the critical importance of proper image parameters and the number of photographs taken in achieving an accurate and detailed 3D model. Several key factors which influence the quality and precision of the model as well as the occurrence of errors such as deformations and distortions were identified.

The analysis revealed that an insufficient number of images results in a 3D model burdened with numerous geometric errors potentially leading to unnatural distortions of the object (Fig. 9). When the number of images is too low, the software cannot detect enough common points, which impairs the precise reconstruction of the object's geometry. In the bas-relief model, for example, effects such as stretching or distortion of certain sections were observed—directly caused by too few images and an insufficient overlap between frames. In the case analyzed, the minimum number of images required to reconstruct the bas-relief was estimated at 100.



Ryc. 9. Płaskorzeźba św. Judy Tadeusza – modele 3D stworzone metodą fotogrametrii w zależności od liczby użytych zdjęć: a) 30, b) 50, c) 70; fot. A. Banaś

Fig. 9. Bas-relief of St. Jude Thaddeus – 3D models generated using photogrammetry depending on the number of images used: a) 30, b) 50, c) 70; photo by A. Banaś

niając jednocześnie dostateczną liczbę punktów charakterystycznych dla dokładnego dopasowania. W sytuacji mniejszego nakładania się, np. poniżej 50%, obszary wspólne są zbyt małe, aby algorytmy były w stanie znaleźć odpowiednią liczbę dopasowań, co prowadzi do błędów w orientacji i sprawia, że pełna rekonstrukcja modelu jest niestabilna, a często niemożliwa.

Ostrość zdjęć okazała się jednym z najważniejszych parametrów wpływających na dokładność modelu fotogrametrycznego. Zdjęcia o słabej ostrości generują błędy na etapie dopasowywania punktów charakterystycznych, co przekłada się na brak precyzji w odwzorowaniu powierzchni obiektu. W wypadku analizowanej płaskorzeźby zauważono, że dodatkowe, celowo wykonane częściowo nieostre zdjęcia znacząco obniżają jakość uzyskanego modelu jako całości, zwłaszcza w miejscach o złożonej teksturze. Duża ostrość jest zatem niezbędna, aby uzyskać wierne odwzorowanie najdrobniejszych detali obiektu.

Pomimo istotnej roli ostrości i odpowiedniej liczby zdjęć rozdzielczość i oświetlenie pozostają równie ważnymi czynnikami wpływającymi na dokładność modelu.

Wnioski

Zastosowanie techniki fotogrametrii w połączeniu z drukiem 3D pozwala na szybkie i efektywne odwzorowanie obiektów trójwymiarowych na podstawie zdjęć dwuwymiarowych. W porównaniu do zaawansowanych technologii takich jak skanery laserowe fotogrametria jest zdecydowanie bardziej dostępna, co czyni ją idealnym rozwiązaniem do tworzenia tymczasowych replik obiektów historycznych, w tym sakralnych. Proces ten pozwala na odtworzenie geometrii przestrzennej obiektu bez potrzeby angażowania artysty. Fotogrametria minimali-

Applying optimal image overlap in the 60–80% range minimizes the aforementioned errors by ensuring a sufficient number of key points for accurate alignment. In cases of lower overlap—e.g. below 50%—the common areas between images are too small for the algorithms to identify enough matches leading to orientation errors and making full model reconstruction unstable or even impossible.

Image sharpness proved to be one of the most critical parameters affecting the accuracy of the photogrammetric model. Low-sharpness images generate errors during the key point matching phase, directly impacting the precision of surface reproduction. In the case of the analysed bas-relief, additional deliberately blurred images significantly reduced the overall quality of the resulting model, particularly in areas with complex texture. High sharpness is, therefore, essential for achieving accurate reproduction of even the finest details.

Despite the key role of sharpness and the number of images, resolution and lighting remain equally important factors influencing model accuracy.

Conclusions

The application of photogrammetry combined with 3D printing enables fast and efficient reproduction of three-dimensional objects based on two-dimensional photographs. Compared to advanced technologies, such as laser scanners, photogrammetry is significantly more accessible making it an ideal solution for creating temporary replicas of historical objects, including religious artefacts. This process allows for the reconstruction of an object's spatial geometry without the need to involve an artist. Photogrammetry reduc-

zuje koszty przygotowania tymczasowej lub przewidzianej do ekspozycji w dłuższym czasie repliki. Metoda ta, choć szybka w realizacji, ma jednak pewne ograniczenia, do których należą przede wszystkim koszty drukarki 3D i odpowiedniego oprogramowania. Zrekonstruowany model obiektu zabytkowego, w szczególności zabytku ruchomego, może się charakteryzować niedokładnościami, a jego jakość zależy od warunków oświetleniowych i liczby zdjęć wykonanych pod różnymi kątami.

Zastosowanie standardowego aparatu telefonicznego w połączeniu z oświetleniem LED umożliwiło uzyskanie zdjęć bardzo dobrej jakości, które zapewniły pełne odwzorowanie geometrii płaskorzeźby św. Judy Tadeusza. Autorska technika wielokrotnego fotografovania z różnych kątów w połączeniu z komercyjnym oprogramowaniem pozwoliła na stworzenie cyfrowego bliźniaka płaskorzeźby, wiernie oddającego jej detale, zarówno strukturalne, jak i teksturalne.

es the costs associated with producing either temporary or long-term display replicas. Although rapid to implement, the method does have certain limitations—primarily related to the cost of 3D printers and appropriate software. The reconstructed model of an object of heritage, especially a movable one, may exhibit inaccuracies, and its quality largely depends on lighting conditions and the number of images taken from various angles.

Using a standard smartphone camera combined with LED lighting made it possible to capture high-quality photographs that provided a complete representation of the geometry of the bas-relief of St. Jude Thaddeus. The original technique of multi-angle photography, combined with commercial software, allowed for creating a digital twin of the object that accurately replicated both the structural and textural details of the bas-relief.

Bibliografia / References

Secondary Sources / Opracowania

- Banaś Anna, Niedostatkiwicz Maciej, Bramorski Jacek, *Zastosowanie fotogrametrii i druku 3D w zabezpieczeniu sakralnych zabytków ruchomych podczas sytuacji kryzysowych i konfliktów zbrojnych. Konferencja naukowa „Wyzwania dla ochrony dóbr kultury w czasie konfliktu zbrojnego. 70-lecie Konwencji Haskiej”*, Gdynia 2024.
- Hellwich Olaf, *Photogrammetric Methods*, [w:] *Encyclopedia of GIS*, red. Shashi Shekhar, Hui Xiong, Xun Zhou, Cham 2017.
- Karnicki Rafał, *Przestrzenne odwzorowania fotogrametryczne w badaniach architektonicznych*, [w:] *Dziedzictwo architektoniczne. Badania podstawowe i ich dokumentowanie*, red. Ewa Łużyńska, Wrocław 2018.
- Święty Tadeusz Juda w wierze, pobożności, teologii i sztuce – dawniej i dziś, red. Katarzyna Parzych-Blakiewicz, Ewelina M. Mączka, Sylwia Mikołajczak, Olsztyn 2020.

Publikacje prasowe / Press publications

- Banaś Anna, Niedostatkiwicz Maciej, *Zabezpieczenie detalu architektonicznego obiektu zabytkowego z zastosowaniem fotogrametrii. Część I*, „Przegląd Budowlany” 2025, t. 96, nr 2.
- Banaś Anna, Niedostatkiwicz Maciej, Bramorski Jacek, *Zastosowanie fotogrametrii do tworzenia replik w obiektach zabytkowych*, „Inżynieria i Budownictwo” 2025, t. 81, nr 1.
- Bramorski Jacek, *Kościół pw. Najświętszego Serca Pana Jezusa jako modernistyczny zabytek Gdyni*, „Renowacje i Zabytki” 2024, nr 3.
- Bunsch Eryk, Sitnik Robert, *Kryteria doboru techniki 3D do dokumentacji obiektów dziedzictwa kulturowego. Digitalizacja w muzeach*, Warszawa 2014.

- Cabrelles Miriam, Galcerá Sergio, Navarro Santiago, Lerma José L., Akasheh Talal, Haddad Naif, *Integration of Photogrammetry and Laser Scanning in Cultural Heritage Documentation*, „Journal of Cultural Heritage” 2009, t. 10, nr 3.
- Calvo-Serrano María A., Ortiz-Cordero Rafael, Hidalgo-Fernandez Rafael E., Mesas-Carrascosa Francisco J., Montes-Tubío Francisco de Paula, Triviño-Tarradas Paula, *Historical-Graphical Analysis and Digital Preservation of Cultural Heritage: Case Study of the Baptismal Font of the Church of Santiago Apóstol in Montilla*, „Heritage Science” 2022, t. 10.
- De Reu Jeroen, Plets Gertjan, Verhoeven Geert, De Smedt Philippe, Bats Machteld, Cherretté Bart, De Maeyer Wouter, Deconynck Jasper, Herremans Davy, Laloo Pieter, Van Meirvenne Marc, De Clercq Wim, *Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage*, „Journal of Archaeological Science” 2013, t. 40, nr 2.
- Inzerillo Laura, Di Paola Francesco, *From SfM to 3D Print: Automated Workflow Addressed to Practitioner Aimed at the Conservation and Restoration*, „The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences” 2017, t. XLII-2/W5.
- Kantaro Antreas, Ganetsos Theodore, Petrescu Florian I.T., *Three-Dimensional Printing and 3D Scanning: Emerging Technologies Exhibiting High Potential in the Field of Cultural Heritage*, „Applied Sciences” 2023, t. 13, nr 8.
- Karnicki Rafał, *Photogrammetric Reconstruction Software as a Cost-Efficient Support Tool in Conservation Research*, „Technical Transactions” 2020, t. 117, nr 1.

- Klak Paweł, Kasztel Miroslaw, *Ołtarz z kościoła filialnego pw. św. Bartłomieja w Koninie Żagańskim w odsłonię 3D*, „Lubuskie Materiały Konserwatorskie” 2015, t. 12.
- Miedzińska Danuta, *Przegląd zastosowań metod inżynierii odwrótej do katalogowania i rekonstrukcji dóbr kultury*, „Ochrona Ludności i Dziedzictwa Kulturowego” 2022, nr 1.
- Muradov Magomed, Gardyński Albert, Markiewicz Jakub, *Integration of Multi-Temporal Photogrammetric Images in Conservation Work at the Royal Castle in Warsaw*, „Journal of Modern Technologies for Cultural Heritage Preservation” 2024, t. 3, nr 4.
- Saha Sunita, Tomkowska Anna, Martusewicz Jacek, Sitnik Robert, *Application of 3D Technologies in the Reconstruction of a Ceramic Venus Figurine from the Collection of the Museum of Ceramic Techniques in Koło*, „SSRN Electronic Journal” 2022.
- Salagean-Mohora Irina, Anghel Anamaria A., Frigura-Iliasa Flaviu M., *Photogrammetry as a Digital Tool for Joining Heritage Documentation in Architectural Education and Professional Practice*, „Buildings” 2023, t. 13, nr 2.
- Suchocki Czesław, Okrój Sebastian, Błaszczak-Bąk Wioleta, *Methodology for the Measurement and 3D Modelling of Cultural Heritage*, „Reports on Geodesy and Geoinformatics” 2023, t. 116.
- Tommasi Cinzia, Achille Cristiana, *Documenting Complex Architectonical Structures with Dense Image Matching: The Case of San Michele in Foro Church*, „ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences” 2016, t. III-5.
- Tysiąc Paweł, Sieńska Anna, Tarnowska Marta, Kędziorski Piotr, Jagoda Marcin, *Combination of Terrestrial Laser Scanning and UAV Photogrammetry for 3D Modelling and Degradation Assessment of Heritage Building*, „Heritage Science” 2023, t. 11.
- Učakar Andrej, Sterle Ana, Vuga Martina, Trček Pečak Tamara, Trček Denis, Ahtik Jure, Košak Karin, Muck Deja, Gabrijelčič Tomc Helena, Kočevar Tanja N., *3D Digital Preservation, Presentation, and Interpretation of Wooden Cultural Heritage on the Example of Sculptures of the Forma Viva Kostanjevica na Krki Collection*, „Applied Sciences” 2022, t. 12, nr 17.
- Wabiński, Jakub, Mościcka Albina, *Natural Heritage Reconstruction Using Full-Color 3D Printing: A Case Study of the Valley of Five Polish Ponds*, „Sustainability” 2019, t. 11, nr 21.
- Zachos Aristeidis, Anagnostopoulos Christos-Nikolaos, *Using Terrestrial Laser Scanning, Unmanned Aerial Vehicles and Mixed Reality Methodologies for Digital Survey, 3D Modelling and Historical Recreation of Religious Heritage Monuments*, „arXiv” 2023.

Źródła internetowe / Internet sources

mjk/ mow/, Średniowieczna figura Matki Bożej Łokietkowej z Wiślicy wydrukowana w 3D, Dzieje.pl, 23 lipca 2016, <https://dzieje.pl/dziedzictwo-kulturowe/sdm-sredniowieczna-figura-matki-bozej-lokietkowej-z-wislicy-wydrukowana-w-3d> (dostęp: 27.04.2025).

Streszczenie

Podczas użytkowania zabytków nieruchomych bardzo często zachodzi potrzeba wykonania kopii oryginału, niezradko będącego sakralnym obiektem muzealnym lub elementem wyposażenia obiektu sakralnego. Wykonanie wierniej kopii użytkowej, niezależnie od przyczyn stojących za koniecznością jej powstania, wymaga zastosowania odpowiedniej techniki umożliwiającej stworzenie samego duplikatu. Najważniejszymi wymaganiami wobec tej techniki są: krótki czas realizacji, dobra jakość oraz stosunkowo mały koszt wykonania. Ważna jest również uniwersalność samej metody, jej dostępność oraz łatwość zastosowania w praktyce. Wymogi te spełnia technika fotogrametrii, która w połączeniu z drukiem 3D pozwala na szybkie tworzenie wiernych duplikatów zabytków ruchomych. Niniejszy artykuł stanowi studium przypadku, w którym przedstawiono zastosowanie fotogrametrii do wykonania dokładnej kopii płaskorzeźby sakralnej. Omówiono w nim zarówno zalety, jak i ograniczenia tej techniki oraz określono istotne parametry umożliwiające uzyskanie trójwymiarowego wydruku 3D na podstawie rekonstrukcji wykonanej z serii zdjęć dwuwymiarowych.

Abstract

During the use or maintenance of immovable heritage structures, there is often the need to create a copy of an original element, which is frequently a religious museum piece or a part of liturgical furnishings. Producing an accurate and functional replica—regardless of the underlying reasons—requires a technique capable of accurate reproduction. Key requirements for such a technique include short production time, high quality and relatively low cost. Additionally, the method should be versatile, widely accessible and easy to apply in practice. Photogrammetry, especially when combined with 3D printing, fulfils these requirements and enables the rapid creation of accurate replicas of movable objects of heritage. This article presents a case study involving the use of photogrammetry to produce a precise replica of a religious bas-relief. The study discusses both the advantages and the limitations of this approach, and identifies key parameters that enable the production of a 3D printed model based on a reconstruction from two-dimensional photographic data.