

Od redakcji

Zeszyt 1/2025 „Inżynierii i Budownictwa” zawiera artykuły przygotowane przez pracowników naukowych i doktorantów wydziałów politechnik. Za tę współpracę składamy serdeczne podziękowania.

Wyrażam nadzieję, że zeszyt zainteresuje wszystkich naszych Czytelników.

DOI: 10.5604/01.3001.0054.8820

Dr inż. ANNA BANAŚ (ORCID: 0000-0003-4760-4592)

Dr hab. inż. MACIEJ NIEDOSTATKIEWCZ, prof. PG (ORCID: 0000-0002-6451-6220)

Politechnika Gdańska

Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Ks. prof. dr hab. JACEK BRAMORSKI (ORCID: 0000-0002-5742-9428)

Akademia im. Stanisława Moniuszki w Gdańsku

Wydział Dzyrygentury, Muzyki Kościelnej, Edukacji Artystycznej, Rytmiki i Jazzu

Parafia pw. Najświętszego Serca Pana Jezusa w Gdyni

Zastosowanie fotogrametrii do tworzenia replik w obiektach zabytkowych

Application of photogrammetry for creating replicas in historical buildings

STRESZCZENIE: Podczas użytkowania zabytków nieruchomych, którymi bardzo często są obiekty sakralne, nierzadko zachodzi konieczność stworzenia, znajdującego się wewnątrz obiektu, kopii oryginalnego elementu, w tym również będącego zabytkiem ruchomym. Realizacja wiernej kopii użytkowej, niezależnie od przyczyn konieczności jej wykonania, wymaga zastosowania techniki umożliwiającej stworzenie samej repliki. Kluczowymi wymaganiami dla techniki tworzenia replik zabytków ruchomych są szybkość ich wykonania, wysoka jakość oraz niski koszt realizacji. Istotnym zagadnieniem jest również uniwersalność samej metody, jak również jej dostępność oraz łatwość jej aplikacji. Wymagania te spełnia technika fotogrametrii, która w połączeniu z drukiem 3D umożliwia tworzenie w szybkim czasie wiernych replik zabytków ruchomych, w tym będących wyposażeniem obiektów sakralnych. Artykuł stanowi studium przypadku, w którym opisano i przedstawiono zastosowanie techniki fotogrametrii do realizacji wiernej kopii rzeźby sakralnej. W pracy omówiono zarówno wady, jak i zalety techniki fotogrametrycznej, określono istotne parametry umożliwiające stworzenie przestrzennego wydruku 3D na podstawie rekonstrukcji grupy standardowych zdjęć dwuwymiarowych.

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

ABSTRACT: During using immovable monuments, which are very often religious objects, it is often necessary to create a copy of the original element inside the object, including a movable monument. The creation of a faithful usable copy, regardless of the reasons for the need to make it, requires the use of a technique that allows the creation of the replica itself. The key requirements for the technique of creating replicas of movable monuments are the speed of their production, high quality and low cost of implementation. Another important issue is the universality of the method itself, as well as its availability and ease of its application. These requirements are met by the photogrammetry technique, which, in combination with 3D printing, allows for the creation of faithful replicas of movable monuments, including those that are equipment of religious objects, in a short time. The article is a case study in which the application of the photogrammetry technique to create a faithful copy of a religious sculpture is described and presented. The paper discusses both the advantages and disadvantages of the photogrammetric technique, and determines important parameters that enable the creation of a spatial 3D print based on the reconstruction of a group of standard two-dimensional photographs.

Keywords: photogrammetry, reconstruction, historic objects, 3D printing, movable monuments, museum replicas.

Zabytkami ruchomymi są najczęściej obiekty muzealne stanowiące ekspozycje albo wyposażenie obiektów użyteczności publicznej, jakimi są muzea oraz galerie sztuki. Nierzadko są jednak nimi elementy stanowiące wyposażenie obiektów sakralnych. Zabytki ruchome mogą wymagać demontażu i czasowego usunięcia ze stanowisk ekspozycyjnych ze względu na prace remontowo-naprawcze obiektów, w których są zgromadzone, przechowywane bądź eksponowane [1÷5], konieczność ich okresowej konserwacji, naprawy spowodowanej aktami wandalizmu [6] albo w przypadku działań prewencyjnych, polegających na ich zabezpieczeniu w związku z rozwojem sytuacji kryzysowej, w tym konfliktu zbrojnego [7]. Bardzo często na czas demontażu oryginalnego zabytku ruchomego konieczne jest tymczasowe ustawienie w miejscu oryginału jego repliki z zachowaniem pełnej świadomości, że jest to jedynie czasowa kopia, natomiast oryginał znajduje się w innym miejscu. W ostatnim okresie coraz większe zastosowanie w realizacji replik zabytków ruchomych znajduje technika fotogrametryczna, która w połączeniu z drukiem 3D umożliwia świadome tworzenie, najczęściej tymczasowych, kopii eksponatów muzealnych.

Zagadnienie to zostało przedstawione w niniejszym artykule w postaci jego praktycznej aplikacji do stworzenia repliki rzeźby stanowiącej zwieńczenie chrzcielnicy w kościele pw. Najświętszego Serca Pana Jezusa w Gdyni. W pracy omówiono ograniczenia metody realizacji wydruków 3D oraz wskazano jej zalety, jak również wstępnie określono dalsze kierunki rozwoju fotogrametrii jako techniki znajdującej zastosowanie w ochronie dziedzictwa kultury.

Przegląd literatury

Fotogrametria oraz druk 3D stają się coraz bardziej cenionymi narzędziami w ochronie dziedzictwa kulturowego i inżynierii lądowej, dzięki zdolności do odwzorowania zarówno najdrobniejszych detali, jak i dużych struktur. Technologie te umożliwiają tworzenie precyzyjnych modeli cyfrowych oraz fizycznych replik, które pozwalają na analizę, konserwację i ekspozycję obiektów przy minimalnej ingerencji w ich strukturę.

Przykładem zastosowania fotogrametrii jest dokumentacja zabytkowej architektury, jak pokazali Remondino i in. [8], gdzie cyfrowe modele pozwoliły na szczegółową analizę strukturalną oraz identyfikację uszkodzeń niewidocznych podczas tradycyjnych badań. Z kolei Tommasi i Achille [9] zastosowali tę technologię do stworzenia cyfrowych modeli rzeźb, co pozwoliło na przeprowadzenie prac konserwatorskich bez konieczności bezpośredniego kontaktu z delikatnymi eksponatami. Kersten i Lindstaedt [10] zastosowali fotogrametrię do szczegółowej dokumentacji zabytkowych budynków, demonstrując jej skuteczność w analizie trudno dostępnych detali.

Druk 3D pozwala przekształcać modele fotogrametryczne w fizyczne repliki o wysokiej dokładności. De Reu i in. [11] stworzyli w ten sposób repliki artefaktów archeologicznych, które znalazły zastosowanie w edukacji i muzealnictwie. Cabrelles i in. [12] odwzorowali detale architektoniczne historycznych budynków, wspierając prace konserwatorskie. Badania Chiozzinigo i in. [13] rozszerzyły te możliwości, moni-

torując wpływ warunków środowiskowych na zabytki, co pozwala na lepsze planowanie długoterminowej ochrony.

Fotogrametria w połączeniu z drukiem 3D pozwala na rekonstrukcję cyfrową i fizyczną obiektów zabytkowych, wspierając ich analizę, konserwację i prezentację. Minimalizując ingerencję w strukturę zabytków, technologie te stanowią kluczowe narzędzie współczesnej ochrony dziedzictwa kulturowego. Dzięki ich rozwojowi możliwe jest lepsze zrozumienie, zachowanie i udostępnianie dziedzictwa przyszłym pokoleniom, co czyni je fundamentem w badaniach nad jego ochroną.

Technika fotogrametrii

Podstawy teoretyczne fotogrametrii

Fotogrametria to interdyscyplinarna dziedzina nauki i techniki, która zajmuje się pozyskiwaniem szczegółowych informacji o obiektach fizycznych i środowisku za pomocą rejestracji, pomiaru i interpretacji obrazów fotograficznych oraz innych systemów rejestrujących promieniowanie elektromagnetyczne [13÷15]. W szczególności fotogrametria inżynierska koncentruje się na tworzeniu precyzyjnych modeli trójwymiarowych (3D) na podstawie zdjęć dwuwymiarowych (2D), co znajduje szerokie zastosowanie w inżynierii, archeologii, ochronie zabytków oraz dokumentacji przestrzennej [16].

Podstawową zasadą działania fotogrametrii jest triangulacja fotogrametryczna, która umożliwia określenie położenia punktów w przestrzeni 3D na podstawie co najmniej dwóch zdjęć tego samego obiektu wykonanych z różnych perspektyw. Proces ten opiera się na geometrii rzutów centralnych, gdzie znajomość współrzędnych tłowych punktów na zdjęciach oraz elementów orientacji wewnętrznej i zewnętrznej kamery pozwala na precyzyjne obliczenie współrzędnych przestrzennych X, Y, Z , X_s, Y_s, Z_s . Elementy orientacji wewnętrznej odnoszą się do parametrów kalibracji kamery, takich jak ogniskowa, współrzędne głównego punktu obrazu oraz parametry dystorsji, natomiast orientacja zewnętrzna określa położenie i rotację kamery w przestrzeni w momencie rejestracji zdjęcia.

W fotogrametrii kluczową rolę odgrywają wzory pozwalające na przekształcenie współrzędnych 2D z obrazu na współrzędne 3D w przestrzeni. Główne równania opisujące ten proces to równania kolineacji oraz wzory związane z kalibracją kamery, które pozwalają na dokładne odwzorowanie geometrii przestrzennej. Podstawowym równaniem jest wzór kolineacji wykorzystujący macierz obrotu \mathbf{R} , która przekształca układ współrzędnych zdjęcia do układu współrzędnych obiektu:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

gdzie:

f – odległość obrazowa,

(X_s, Y_s, Z_s) – współrzędne środka rzutów,

\mathbf{R} – macierz obrotu, gdzie elementy R_{ij} są funkcjami kątów rotacji $(\omega, \varphi, \kappa)$, które opisują orientację kamery w przestrzeni, definiowanej jako

$$R = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & \cos \varphi \sin \kappa & -\sin \varphi \\ \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa - \cos \omega \sin \kappa & \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa + \cos \omega \cos \kappa & \sin \omega \cos \varphi \\ \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa & \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa - \sin \omega \cos \kappa & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad (2)$$

gdzie:

ω – kąt obrotu wokół osi X (pochylenie),

φ – kąt obrotu wokół osi Y (przechylenie),

κ – kąt obrotu wokół osi Z (rotacja).

Dodatkowo proces kalibracji kamery wymaga uwzględnienia wewnętrznych parametrów, takich jak współczynniki dystorsji radialnej i tangencjalnej. Matematycznie korekcja dystorsji radialnej opiera się na równaniu

$$r' = r(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6), \quad (3)$$

gdzie:

r – odległość punktu od osi optycznej kamery,

k_1, k_2, k_3 – współczynniki dystorsji.

Dystorsja tangencjalna powoduje przesunięcia punktów obrazu w kierunkach prostopadłych do osi optycznej. Jej korekcję wyraża się równaniami:

$$x' = x + [2p_1 xy + p_2 (r^2 + 2x^2)], \quad (4)$$

$$y' = y + [p_1 (r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy], \quad (5)$$

gdzie:

p_1 i p_2 – współczynniki dystorsji tangencjalnej,

x, y – współrzędne obrazu po korekcji.

Dzięki tym równaniom możliwe jest precyzyjne odwzorowanie geometrii przestrzennej, co stanowi fundament fotogrametrii, umożliwiając nie tylko modelowanie 3D, ale także dokładne analizy i rekonstrukcje przestrzenne.

W fotogrametrii stosuje się różne metody opracowania danych, w zależności od celu pomiaru i zastosowanej techniki [16]. Popularne podejścia obejmują metodę DLT, która umożliwia przekształcenie współrzędnych tłowych na przestrzenne bez znajomości orientacji zewnętrznej zdjęć, oraz metodę wiązek, pozwalającą na wyrównanie sieci promieni z uwzględnieniem nadliczbowych obserwacji, choć wymagającą znacznych zasobów obliczeniowych. Alternatywnie metoda samokalibracji pozwala na korektę błędów orientacji kamery, ale jej precyzja zależy od liczby i rozmieszczenia punktów kontrolnych oraz od warunków pomiarowych.

Współczesne technologie fotogrametryczne korzystają z szerokiego spektrum narzędzi i urządzeń, w tym kamer cyfrowych wysokiej rozdzielczości, dronów wyposażonych w zaawansowane systemy obrazowania oraz oprogramowania do analizy i przetwarzania danych, takich jak Agisoft Metashape, Pix4D czy RealityCapture. Dzięki zaawansowanym algorytmom, takim jak Structure from Motion (SfM) oraz Multi-View Stereo (MVS), możliwe jest automatyczne wykrywanie i dopasowywanie punktów wspólnych między obrazami oraz generowanie gęstych chmur punktów, które są podstawą do budowy modeli 3D.

Nady i zalety techniki fotogrametrii

Dzięki swojej bezdotykowej metodzie fotogrametria jest szczególnie przydatna w dokumentacji wrażliwych artefaktów, minimalizując ryzyko uszkodzeń [10]. Znajduje

ona szerokie zastosowanie, od dużych obiektów architektonicznych po małe artefakty muzealne, a możliwość wykorzystania dronów pozwala dokumentować trudno dostępne miejsca, co zwiększa jej uniwersalność ([9, 17]). Jej skalowalność, jak pokazano w badaniach Tommasiego i Achille [8], umożliwia dostosowanie technologii do różnych budżetów, a szeroka dostępność oprogramowania sprawia, że jest ona dostępna także dla mniejszych jednostek. Ponadto połączenie z drukiem 3D pozwala na tworzenie replik, które znajdują zastosowanie w edukacji i konserwacji [18]. Automatyzacja przetwarzania danych i możliwość analiz wielkoskalowych dodatkowo zwiększają efektywność w dokumentacji dużych konstrukcji, jak mosty, co jest szczególnie istotne przy analizie technicznej wymagającej szybkiego przetwarzania dużych ilości danych [19, 20].

Pomimo że fotogrametria ma liczne zalety, takie jak precyzyjność oraz możliwość nieinwazyjnego pozyskiwania danych, napotyka szereg ograniczeń, które mogą wpływać na jakość i efektywność uzyskiwanych wyników.

Jednym z podstawowych wyzwań jest zależność dokładności pomiarów od warunków oświetleniowych i jakości obrazu [16]. W praktyce oznacza to, że fotogrametria działa optymalnie w dobrze oświetlonym środowisku, gdzie możliwe jest uzyskanie ostrego kontrastu pomiędzy badanym obiektem a jego otoczeniem. W warunkach słabego oświetlenia lub przy nadmiernych refleksach na powierzchni obiektu uzyskane dane mogą być obciążone błędami.

Kolejnym istotnym ograniczeniem jest konieczność kalibracji sprzętu pomiarowego [16]. Aparaty fotograficzne używane do fotogrametrii muszą być odpowiednio skalibrowane, aby uzyskać dokładne odwzorowanie wymiarów przestrzennych. Błąd kalibracji może prowadzić do niedokładności w odwzorowaniu rzeczywistych proporcji i odległości, co w rezultacie ogranicza wiarygodność uzyskanych modeli 3D. Dodatkowo każde urządzenie ma swoje fizyczne ograniczenia, takie jak rozdzielczość i pole widzenia, które mogą wpływać na precyzję pomiaru.

Innym ograniczeniem techniki fotogrametrycznej jest zależność dokładności od geometrii zdjęć [16]. Fotogrametria wymaga uzyskania odpowiednich perspektyw, a więc wykonania zdjęć pod różnymi kątami w stosunku do obiektu. W przypadku obiektów o skomplikowanej budowie, z wieloma niewidocznymi zakamarkami, może być trudno uzyskać pełny i dokładny obraz, co prowadzi do niekompletnych lub zniekształconych modeli. Ponadto uzyskanie zdjęć o wymaganej geometrii bywa trudne lub wręcz niemożliwe w warunkach ograniczonego dostępu, np. w przypadku dużych obiektów infrastrukturalnych lub terenów niedostępnych.

Ograniczenia związane z przetwarzaniem i analizą dużych zbiorów danych stanowią kolejny aspekt utrudniający stosowanie fotogrametrii na dużą skalę [16]. Proces tworzenia modeli 3D z setek lub tysięcy zdjęć wymaga dużych zasobów obliczeniowych oraz wydajnego oprogramowania. Wysoka rozdzielczość obrazów jest pożądana

do uzyskania dokładnych wyników, jednak skutkuje ona wzrostem zapotrzebowania na pamięć i moc obliczeniową, co wydłuża czas przetwarzania i zwiększa koszty operacyjne.

Fotogrametria jest w dużej mierze zależna od cech fizycznych obiektu, takich jak kolor, tekstura i przezroczystość [16]. Obiekty o gładkiej, jednokolorowej powierzchni lub przezroczyste, jak szkło, mogą sprawiać trudności w dokładnym odwzorowaniu, gdyż brak charakterystycznych punktów na ich powierzchni utrudnia identyfikację i dopasowanie obrazów. W przypadku takich materiałów, precyzyjny model może być trudny do uzyskania, co zmniejsza użyteczność fotogrametrii w badaniu tego typu struktur.

Należy zauważyć, że niektóre z tych ograniczeń są stopniowo eliminowane wraz z rozwojem technologii. Fotogrametria cyfrowa oferuje wiele zalet, takich jak automatyzacja pomiaru i szerokie możliwości przetwarzania obrazu, co przyczynia się do zwiększenia jej dokładności i efektywności.

Inspiracja

Kościół pw. Najświętszego Serca Pana Jezusa w Gdyni

Kościół pw. Najświętszego Serca Pana Jezusa jest jednym z najbardziej znanych obiektów sakralnych na terenie Gdyni (rys. 1). Prace projektowe związane z jego realizacją rozpoczęły się w roku 1956 [21]. Kościół zaprojektowany został jako trójnawowy, ze środkową bryłą główną przykrytą dachem pochyłym, którego konstrukcję stanowi ruszt żelbetonowy oraz dwiema nawami bocznymi. Nad prezbiterium została zaprojektowana wieża, tzw. latarnia. Budynek został zaprojektowany jako całkowicie podpiwniczony, znaczą część przyziemia stanowią pomieszczenia tzw. kościoła dolnego, część nadziemną stanowi kościół górny (główny). Autorami projektu architektonicznego byli prof. arch. Jan Borowski i prof. dr inż. arch. Leopold Taraszkiewicz. Roboty budowlane związane z realizacją kościoła rozpoczęto w roku 1957. Pierwszy etap budowy, czyli kościół dolny, ukończono w stanie surowym w roku 1959, stan surowy kościoła górnego zrealizowany został w roku 1961. Przez kolejne 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 roku 1966 roboty budowlane były kontynuowane, w tym wykonano prace związane z wykonywaniem elewacji zewnętrznych. W roku 1972 powstały mozaiki na ścianach prezbiterium oraz rozpoczęto budowę chóru. Budowę żelbetonowej wieży dzwonnicy (kampa-



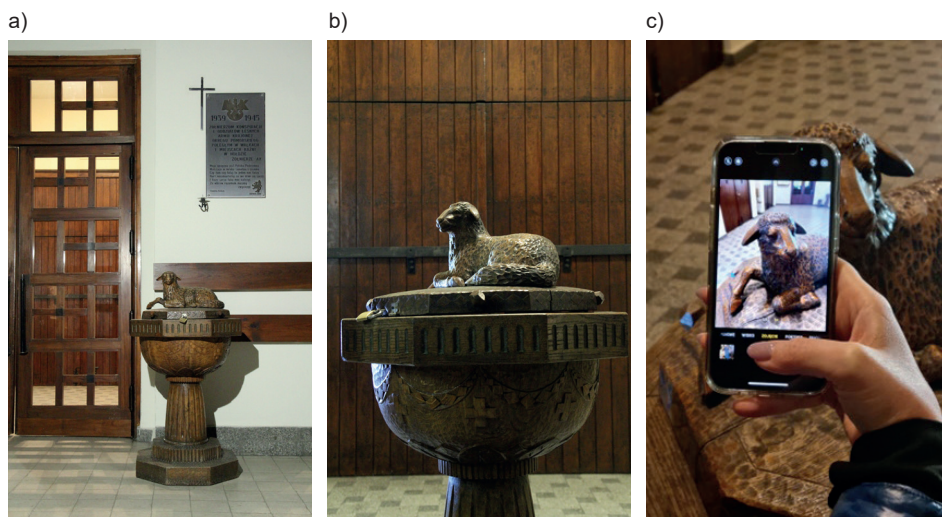
Rys. 1. Kościół pw. Najświętszego Serca Pana Jezusa w Gdyni, stan obecny

ni) rozpoczęto w roku 1973, a zakończono w roku 1981. Aktualnie zespół sakralny parafii pw. NSPJ w Gdyni składa się z następujących obiektów: budynku kościoła wraz z zapleczem, budynku plebanii oraz wieży dzwonnicy.

Chrzcielnica

Chrzcielnica znajdująca się w kościele pw. Najświętszego Serca Pana Jezusa w Gdyni została wykonana przez artystę rzeźbiarza Ignacego Prochowskiego z Krynicy Zdroju. Ufundowały ją rodziny marynarzy z Gdyni. Uroczystego poświęcenia chrzcielnicy dokonał ks. biskup Kazimierz Kowalski 24 maja 1956 r. Od tego czasu aż do końca XX wieku służyła do udzielania chrztu św. Obecnie pełni funkcję kropielnicy przy wejściu do kościoła.

Na pokrywie chrzcielnicy jest umieszczona figura baranka. Obecność baranka ma symbolizować fakt, że zgodnie z doktryną wiary katolickiej ochrzczeni na wzór Chrystusa stają się niewinnymi barankami mocą łaski dziecięctwa Bożego [22, 23].



Rys. 2. Chrzcielnica w kościele pw. NSPJ w Gdyni: a) widok, b) zbliżenie, c) podczas wykonywania zdjęć rzeźby baranka na potrzeby jej rekonstrukcji cyfrowej

Zastosowanie fotogrametrii do tworzenia repliki

Stanowisko badawcze

Tworzenie cyfrowego modelu rzeźby baranka na pokrywie chrcielnicy, o wymiarach rzeczywistych ok. 10,0 × 12,5 × 9,5 cm (szerokość × długość × wysokość), wymagało szczegółowej metodyki obejmującej przygotowanie miejsca pracy, dobór odpowiednich parametrów sprzętowych oraz wykonanie serii zdjęć o wysokiej dokładności (rys. 3). Proces ten obejmował trzy główne etapy: przygotowanie przestrzeni (a), konfigurację sprzętu (b) oraz wykonanie zdjęć fotogrametrycznych (c).

Pierwszy etap (a) obejmował przygotowanie otoczenia rzeźby, mające na celu eliminację cieni i refleksów, które mogłyby zakłócić proces odwzorowania geometrii. Ze względu na niskie natężenie naturalnego światła (poniżej 600 lumenów), zastosowano dodatkowe oświetlenie w postaci halogenu LED o strumieniu świetlnym 2000 lumenów. Dodatkowo chrcielnica została przeniesiona do sąsiedniego pomieszczenia o lepszym oświetleniu. Lampa została umieszczona pod kątem umożliwiającym równomierne doświetlenie powierzchni rzeźby, co pozwoliło na minimalizację kontrastowych cieni i poprawę jakości obrazów.

W drugim etapie (b) przygotowano aparat fotograficzny. Wykorzystano smartfon iPhone 14 z 48-megapikselowym sensorem oraz przysłoną f/1,78, umożliwiającą rejestrowanie obrazów o wysokiej rozdzielczości. Ustawiono czułość ISO na poziomie 100–200 w celu minimalizacji szumów oraz ręcznie skonfigurowano balans bieli, dopasowując go do temperatury barwowej światła sztucznego. Mimo, że nie użyto statywu, stabilizację zapewniły wbudowane (standardowe) funkcje oprogramowania aparatu.

Ostatni etap (c) polegał na wykonaniu 145 zdjęć rzeźby z różnych perspektyw. Zdjęcia wykonywano z odległości 0,5÷1,0 m dla uchwycenia szczegółów oraz z odległości 2,0÷3,0 m dla zachowania pełnego kadru rzeźby. Ważnym elementem była technika nakrzyżowania ujęć – każde

zdjęcie pokrywało co najmniej 60÷80% powierzchni sąsiedniego kadru (rys. 3), co pozwoliło na uzyskanie wystarczającej liczby punktów charakterystycznych do dalszego procesu modelowania.

Rekonstrukcja obrazu

Po wykonaniu zdjęć przystąpiono do ich przetwarzania w programie Agisoft Metashape, który umożliwia rekonstrukcję cyfrowych modeli 3D na podstawie zdjęć wielokątnych. Metodyka obejmowała następujące kroki:

- import zdjęć: wszystkie 145 zdjęć zostało zaimportowanych do oprogramowania i poddanych wstępnej selekcji w celu usunięcia ewentualnych zdjęć rozmytych lub nieostrych – w tym wypadku wszystkie fotografie były prawidłowe;

- wyrównanie zdjęć (rys. 4a): Agisoft Metashape automatycznie dopasował punkty charakterystyczne na zdjęciach, co pozwoliło na zbudowanie chmury punktów reprezentującej powierzchnię rzeźby;

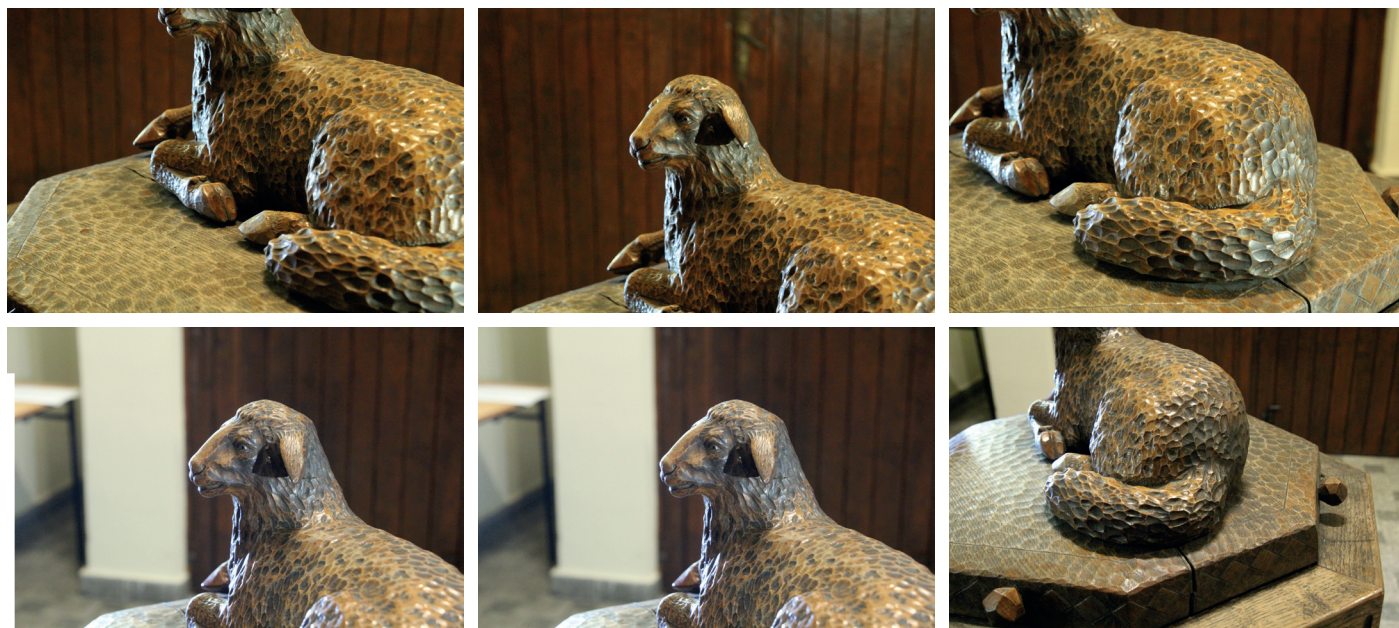
- tworzenie chmury punktów o wysokiej gęstości (rys. 4b): na podstawie dopasowanych zdjęć wygenerowano gęstą chmurę punktów, co umożliwiło odwzorowanie drobnych detali powierzchni;

- modelowanie siatki 3D: z gęstej chmury punktów utworzono siatkę 3D, która stanowi dokładne odwzorowanie geometrii rzeźby;

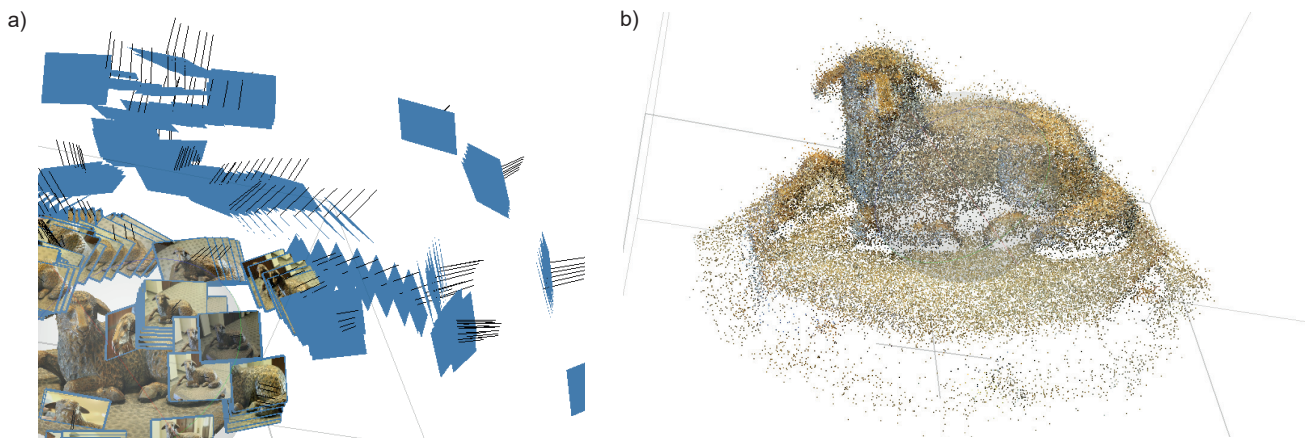
- teksturowanie (rys. 5): na końcu do siatki nałożono tekstury uzyskane z oryginalnych zdjęć, co pozwoliło na odwzorowanie zarówno geometrii, jak i tekstury powierzchni rzeźby.

Wydruk 3D rzeźby

W celu cyfrowej rekonstrukcji i fizycznego odtworzenia rzeźby baranka z pokrywy chrcielnicy zastosowano technologię druku 3D przy użyciu urządzenia Prusa MK4, które pozwala na odwzorowanie skomplikowanych geometrii z wysoką precyzją. Drukarka, wyposażona w eks-



Rys. 3. Rzeźba baranka na pokrywie chrcielnicy przedstawiona z różnych perspektyw, z nakładaniem się zdjęć na poziomie 60÷80%



Rys. 4. Tworzenie repliki rzeźby baranka na pokrywie chrzcielnicy: a) proces wyrównania zdjęć, b) tworzenie chmury punktów o wysokiej gęstości, umożliwiającej precyzyjną rekonstrukcję szczegółów powierzchni



Rys. 5. Drewniana rzeźba baranka na pokrywie chrzcielnicy po zakończeniu procesu teksturowania – realistyczne odwzorowanie zarówno geometrii, detali, jak i tekstury powierzchni rzeźby

truder o średnicy dyszy 0,4 mm oraz system automatycznej kalibracji, zapewnia wysoką jakość i minimalizuje błędy, co czyni ją odpowiednim narzędziem do realizacji projektów artystycznych i zabytkowych.

Z uwagi na skomplikowaną geometrię rzeźby konieczne było zaprojektowanie dodatkowych podpór wspierających elementy o dużym zwisie, co pozwoliło na utrzymanie integralności struktury podczas procesu druku (rys. 6a). Wydruk trwał 4 godziny i 45 minut, zużyto 116,8 gramów PLA, co odpowiada 39,6 metra filamentu o średnicy 1,75 mm.

Podczas druku zastosowano filament PLA (kwas polimlekowy) – materiał ekologiczny, biodegradowalny i charakteryzujący się niską temperaturą topnienia (180–220°C). Wybór tego materiału wynikał z jego właściwości, takich jak dobra stabilność wymiarowa, wysoka jakość powierzchni wydruków oraz precyzyjne odwzorowanie detali, co jest szczególnie istotne w kontekście rzeźb o drobnych elementach dekoracyjnych.

Optymalizacja parametrów procesu, takich jak wypełnienie i ustawienia druku, pozwoliła na ograniczenie kosztów produkcji i czasu realizacji, a jednocześnie zachowanie odpowiedniej wytrzymałości strukturalnej modelu. Wypełnienie na poziomie 15% zapewniło lekkość modelu, tworząc strukturę kratownicową, która skutecznie balansuje oszczędność materiału i odporność mechaniczną (rys. 6b-c).

Efektywny czas realizacji i niski koszt (ok. 5,50 zł w cenach III kwartału 2024 roku) wskazują na potencjał druku 3D w zastosowaniach muzealnych, edukacyjnych i badawczych. Otrzymany model rzeźby baranka jest nie tylko

wiernym odwzorowaniem geometrycznym, ale także trwałym nośnikiem informacji wizualnych, co podkreśla znaczenie tej technologii w rekonstrukcji obiektów artystycznych (rys. 6d).

Zastosowanie technologii druku 3D w połączeniu z biodegradowalnym materiałem PLA wpisuje się w globalne trendy zrównoważonego rozwoju, łącząc precyzję z ekologiczną odpowiedzialnością. Rezultaty przeprowadzonych badań dowodzą, że druk 3D stanowi skuteczne i ekonomiczne narzędzie

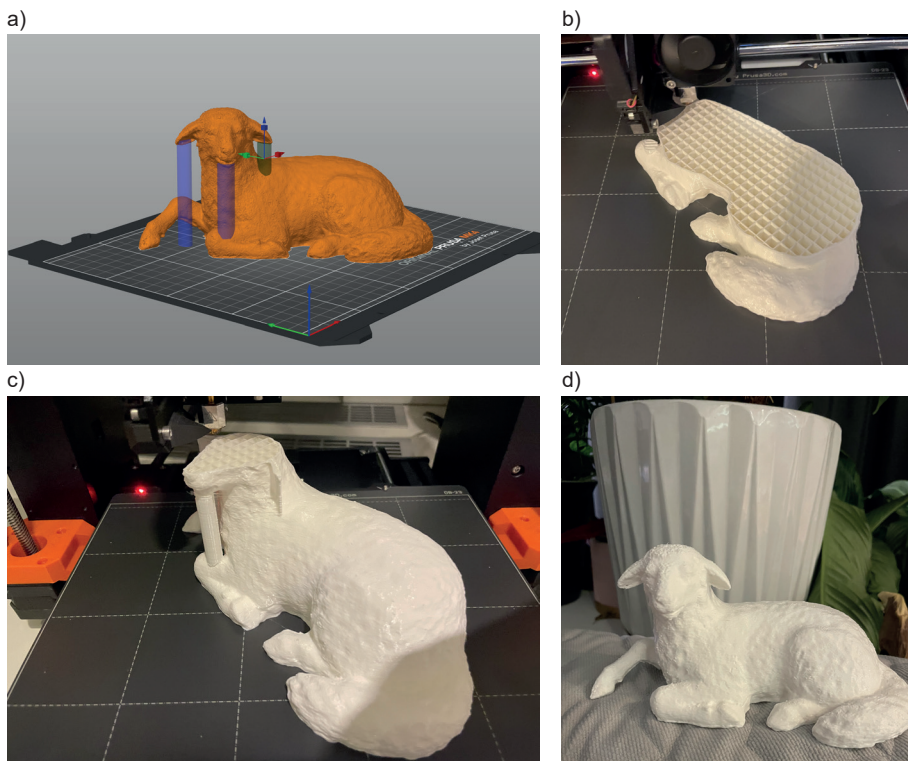
do produkcji modeli o wysokiej jakości, szczególnie w kontekście ochrony dziedzictwa kulturowego i odtwarzania historycznych artefaktów [24÷26].

Analiza wyników rekonstrukcji obrazu

Analiza fotogrametryczna rzeźby baranka zamocowanej na pokrywie chrzcielnicy wykazała, jak istotne są czynniki takie, jak liczba zdjęć, ich ostrość, rozdzielczość oraz stopień nakładania się kadrów dla uzyskania precyzyjnego i wiernego modelu trójwymiarowego (3D). Każdy z tych parametrów odgrywa kluczową rolę w minimalizowaniu błędów i deformacji w odwzorowywaniu skomplikowanej geometrii obiektów zabytkowych.

Najważniejszym czynnikiem wpływającym na jakość modelu była liczba wykonanych zdjęć. Analiza wykazała, że minimalna liczba zdjęć konieczna do precyzyjnej rekonstrukcji rzeźby wynosi ok. 85, przy czym zbyt mała liczba ujęć skutkuje błędami geometrycznymi, takimi jak nienaturalne zniekształcenia lub „naciągnięcia” niektórych fragmentów obiektu. Szczególnie istotne było nakładanie się zdjęć na poziomie 60÷80%, które zapewniało wystarczającą liczbę punktów charakterystycznych dla algorytmów dopasowujących. Gdy nakładanie spadało poniżej 50%, pojawiały się trudności z rekonstrukcją fragmentów obiektu, co powodowało niestabilność i błędy w modelu 3D (rys. 7).

Równie kluczowym parametrem była ostrość zdjęć. Zdjęcia o niskiej ostrości generowały znaczące błędy w odwzorowywaniu tekstury i detali rzeźby, szczególnie



Rys. 6. Replika rzeźby baranka na pokrywie chrzcielnicy: a) fragment projektu rzeźby przygotowany w oprogramowaniu do druku 3D wraz z tymczasowymi podporami, b) struktura wewnętrzna fragmentu rzeźby z kratownicowym wypełnieniem, c) końcowy etap drukowania, nakładanie ostatnich warstw rzeźby na poprzednie oraz widoczne tymczasowe podpory, d) finalny produkt – rzeźba

w obszarach o złożonej strukturze powierzchni. W analizowanym przypadku celowo wykonane zdjęcia częściowo nieostre znacząco obniżyły jakość końcowego modelu, co potwierdziło, że wysoka ostrość zdjęć jest niezbędna do

rekonstrukcji rzeźby baranka zamocowanej na pokrywie chrzcielnicy, a także innych obiektów muzealnych, szczególnie o charakterze sakralnym, powinien być oceniany indywidualnie. Ilościowy udział poszczególnych parametrów, takich

Przeprowadzone badania pokazują, że fotogrametria, przy odpowiednim doborze parametrów procesu, może być skutecznym narzędziem w rekonstrukcji zabytków. Jednak aby osiągnąć optymalną jakość modelu, konieczne jest dalsze badanie wpływu czynników takich, jak minimalna liczba zdjęć, ich ostrość i nakładanie się kadrów. Kolejne analizy mogą również uwzględniać wykorzystanie różnych źródeł światła oraz technik przetwarzania obrazów, co mogłoby jeszcze bardziej usprawnić proces rekonstrukcji zabytkowych obiektów.

Na podstawie analizy wyników przeprowadzonych serii próbnych stwierdzono, że intensywność oświetlenia w przypadku chęci uzyskania ostrego obrazu zrekonstruowanego wynosi co najmniej 1000 lumenów. Jednocześnie zauważono, że zalecane jest stosowanie barwy oświetlenia mieszczącej się w granicach 4000±5500 K, co zapewnia neutralne, naturalne światło, sprzyjające dokładności odwzorowania szczegółów.

Należy podkreślić, że wpływ omówionych czynników na jakość rekon-



Rys. 7. Drewniana rzeźba baranka na pokrywie chrzcielnicy – model 3D stworzony metodą fotogrametrii przy użyciu różnej liczby zdjęć: a) 20, b) 30, c) 50 fotografii

wiernego odwzorowania drobnych elementów (rys. 8).

Rozdzielczość oraz jakość oświetlenia również miały istotny wpływ na dokładność modelu. W przypadku rzeźby baranka minimalna rozdzielczość zdjęć konieczna do uzyskania modelu przy zalecanym nakładaniu kadrów wynosiła 300 dpi. Niewystarczające oświetlenie prowadziło do strat w jakości zdjęć, a w konsekwencji – do niedokładności w rekonstrukcji.



Rys. 8. Brak ostrości detali, rozmycia i niedokładności w teksturze oraz zmniejszona precyzja w odwzorowaniu powierzchni obiektu będące następstwem użycia fotografii o niedostatecznej ostrości

jak liczba zdjęć, ich ostrość czy rozdzielczość, zależy w dużej mierze od specyficznych cech obiektu: jego wymiarów, przestrzennej formy oraz złożoności tekstury powierzchni. Indywidualne podejście do każdego przypadku jest kluczowe dla uzyskania wiernego odwzorowania i minimalizacji błędów w procesie rekonstrukcji.

Wnioski

Zastosowanie techniki fotogrametrii w połączeniu z drukiem 3D wykazało dużą skuteczność w odwzorowywaniu skomplikowanych obiektów trójwymiarowych, takich jak rzeźba baranka stanowiąca zwieńczenie pokrywy chrzcielnicy. Fotogrametria, dzięki swojej dostępności i niskim kosztom w porównaniu z zaawansowanymi technologiami, takimi jak skanery laserowe, stanowi atrakcyjne narzędzie do tworzenia replik zabytków historycznych, zwłaszcza tam, gdzie konieczne jest szybkie wykonanie modelu na podstawie archiwalnych zdjęć lub materiałów ikonograficznych.

Przeprowadzony eksperyment, wykorzystujący standardowy aparat telefoniczny (iPhone 14) w połączeniu z oświetleniem LED, umożliwił uzyskanie wysokiej jakości zdjęć, które posłużyły do stworzenia cyfrowego bliźniaka obiektu. Dzięki zastosowaniu oprogramowania Agisoft Metashape oraz technice wielokrotnego fotografowania pod różnymi kątami, możliwe było wierne odwzorowanie zarówno strukturalnych, jak i teksturalnych detali rzeźby. Stworzony model cyfrowy posłużył jako podstawa do wykonania fizycznej repliki za pomocą druku 3D, co potwierdziło efektywność tej metody w ochronie i dokumentacji dziedzictwa kulturowego.

Mimo licznych zalet, takich jak niski koszt i łatwość dostępu, metoda fotogrametryczna wymaga optymalnych warunków oświetleniowych oraz odpowiedniej liczby zdjęć wykonanych z różnych perspektyw, co może stanowić wyzwanie w przypadku ograniczeń związanych z dostępnością obiektu czy jakością materiałów źródłowych. Ponadto koszty związane z drukarką 3D, choć niższe niż w przypadku innych technologii, nadal mogą być istotnym ograniczeniem w realizacji większych projektów.

Dalsze badania nad zastosowaniem fotogrametrii do tworzenia replik zabytków ruchomych, jak również elementów zabytków nieruchomych skupią się na optymalizacji procesu. Planowane jest m.in. określenie minimalnej liczby zdjęć wymaganych do uzyskania modelu 3D o wysokiej jakości oraz analiza wpływu różnorodnych warunków oświetleniowych na dokładność odwzorowania. W ramach przyszłych prac badawczych rozważana jest również możliwość wykorzystania materiałów ikonograficznych, w tym zdjęć analogowych o różnej rozdzielczości, co mogłoby rozszerzyć zastosowanie tej metody do rekonstrukcji obiektów, dla których brak jest cyfrowej dokumentacji fotograficznej.

PIŚMIENICTWO

- [1] Baranowski W.: Zużycie obiektów budowlanych. Wydawnictwo Warszawskiego Centrum Postępu Techniczno-Organizacyjnego Budownictwa, Ośrodek Szkolenia WACETOB sp. z o.o., Warszawa, 2000.
- [2] Niedostatki M.: Prace remontowo-naprawcze w obiektach

zabytkowych. Wybrane przykłady. Wydawnictwo Bernardinum, Pelplin, 2023.

- [3] Runkiewicz L.: Przyczyny powstawania zagrożeń, awarii i katastrof obiektów budowlanych. *Przegląd Budowlany*, 91, 5, 48-49, 2020.
- [4] Sendkowski J.: Problemy diagnostyki technicznej obiektów budowlanych. *Diagnostyka*, 3, 39, 285-290, 2006.
- [5] Substyk M.: Utrzymanie i kontrola okresowa obiektów budowlanych. Wydawnictwo ODDK, Warszawa, 2012.
- [6] Banaś A., Niedostatki M., Bramorski J.: Zastosowanie fotogrametrii do tworzenia duplikatów zabytków ruchomych. *Przegląd Budowlany*, Warszawa, 2025.
- [7] Banaś A., Niedostatki M., Bramorski J.: Zastosowanie fotogrametrii i druku 3D w zabezpieczeniu sakralnych zabytków ruchomych podczas sytuacji kryzysowych i konfliktów zbrojnych [w:] Konferencja Naukowa „Wyzwania dla ochrony dóbr kultury w czasie konfliktu zbrojnego”. 70-lecie Konwencji Haskiej, Gdynia, 2024.
- [8] Remondino F., El-Hakim S.: Image-based 3D modelling: A review. *The Photogrammetric Record*, 26 (136), 269-291, 2011.
- [9] Tommasi C., Achille C.: Documenting complex architectural structures with dense image matching: The case of San Michele in foro church. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, III-5, 67-74, 2016.
- [10] Kersten T.P., Lindstaedt M.: Image-based low-cost systems for automatic 3D recording and modelling of archaeological finds and objects. *Geoinformatics FCE CTU*, 6, 292-299, 2012.
- [11] De Reu J., et al.: Application of the 3D recording techniques in archaeology: Comparison between traditional and modern methods. *Journal of Archaeological Science*, 40 (7), 3116-3127, 2013.
- [12] Cabrelles M., et al.: Integration of photogrammetry and laser scanning in cultural heritage documentation. *Journal of Cultural Heritage*, 10 (3), 291-299, 2009.
- [13] Chiozzini G., et al.: Long-term structural monitoring of historical buildings by photogrammetric surveys using UAVs and 3D printing technologies. *International Journal of Architectural Heritage*, 12 (2), 249-263, 2018.
- [14] Bunsch E., Sitnik R.: Kryteria doboru techniki 3D do dokumentacji obiektów dziedzictwa kulturowego. *Digitalizacja w muzeach*, (2), 3-30. Narodowy Instytut Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów, Warszawa, 2014.
- [15] Bernasik J., Mikrut S.: Fotogrametria Inżynierska. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Kraków, 2007.
- [16] Foramitti H.: Fotogrametria stosowana w konserwacji zabytków. *Ochrona Zabytków*, 20 (2 (77)), 24-38, 1967.
- [17] Hellwich O.: Photogrammetric Methods [w:] Shekhar, S., Xiong, H., Zhou, X. (eds) *Encyclopedia of GIS*. Springer, Cham, 2017, https://doi.org/10.1007/978-3-319-17885-1_981.
- [18] Nex F., Remondino F.: UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6 (1), 1-15, 2014.
- [19] Scopigno R., et al.: Digital 3D replicas for cultural heritage preservation. *IEEE Signal Processing Magazine*, 28 (5), 87-96, 2011.
- [20] Zhang L., et al.: Condition assessment of reinforced concrete bridges based on photogrammetry and deep learning. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6 (2), 113-126, 2016.
- [21] Bramorski J.: Kościół pw. Najświętszego Serca Pana Jezusa jako modernistyczny zabytek Gdyni. *Renowacje i Zabytki*, 3, 82-89, 2024.
- [22] Ryken L., Wilhoit J.C., Longman T.: *Słownik symboliki biblijnej*. Vocatio, Warszawa, 1998.
- [23] Forstner D.: *Świat symboliki chrześcijańskiej*. PAX, Warszawa, 1990.
- [24] Puzatova A., et al.: Large-Scale 3D Printing for Construction Application by Means of Robotic Arm and Gantry 3D Printer: A Review. *Buildings*, 12 (11), 2023, <https://doi.org/10.3390/buildings12112023>.
- [25] Mahmood A., et al.: Polymer Composites in 3D/4D Printing: Materials, Advances, and Prospects. *Molecules*, 29 (2), 319, 2024, <https://doi.org/10.3390/molecules29020319>.
- [26] Guamán-Rivera R., et al.: Recent Developments and Challenges of 3D-Printed Construction: A Review of Research Fronts. *Buildings*, 12 (2), 229, 2022, <https://doi.org/10.3390/buildings12020229>.