

Karol Argasiński*

orcid.org/0000-0002-8250-7109

Krzysztof Koszewski**

orcid.org/0000-0002-7907-746X

Segmentacja semantyczna jako istota modelowania informacji o zabytku

Semantic Segmentation as the Essence of Heritage Building Information Modelling

Słowa kluczowe: segmentacja semantyczna, cyfrowy bliźniak, HBIM, BIM, modele wirtualne, dziedzictwo architektoniczne, digitalizacja 3D

Keywords: semantic segmentation, digital twin, HBIM, BIM, virtual models, architectural heritage, 3D Digitization

Wstęp

Tworzenie cyfrowych modeli 3D w obszarze dziedzictwa architektonicznego i archeologicznego jest dynamicznie rozwijającym się obszarem badań. Dzieje się tak m.in. dzięki rozwojowi technik rejestracji i odwzorowania obiektów w przestrzeni. Popularność wirtualnych modeli wynika także z rosnącej, jeśli nie decydującej, roli cyfrowych środków komunikacji i konieczności obecności dziedzictwa w przestrzeni wirtualnej komunikacji [Taylor, Gibson 2016], w tym możliwości publikacji i korzystania z danych dostępnych w sieciach społecznościowych [Themistocleous 2017]. Modele te są pozyskiwane jako odwzorowania geometrii zabytków – fizycznych artefaktów – w przestrzeni wirtualnej z wykorzystaniem zapisu cyfrowego w postaci chmur punktów. Istnieją i rozwijają się różne techniki pozyskiwania informacji przestrzennych dotyczących obiektów dziedzictwa i zapisywania ich w postaci cyfrowej: TLS (*Terrestrial Laser Scanning*), SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*), SfM (*Structure from Motion*), wykorzystanie UAV (*Unmanned Air Vehicle*),

Introduction

The creation of digital 3D models within the domain of architectural and archaeological heritage constitutes a rapidly expanding area of research. This trend is partly attributable to the evolution of methodologies for documenting and mapping spatial objects. The growing prominence of virtual models reflects both the increasing reliance on digital modes of communication and the necessity for heritage to maintain a presence in virtual environments [Taylor, Gibson 2016], including the capacity to disseminate and utilize data via social media platforms [Themistocleous 2017]. These models are generated as representations of the geometry of monuments—physical artifacts—within virtual space, typically derived through digital recording in the form of point clouds. A wide array of techniques has been developed to capture and digitize spatial information concerning heritage sites. Among these are Terrestrial Laser Scanning (TLS), Simultaneous Localization and Mapping (SLAM), Structure from Motion (SfM), Unmanned Aerial Vehicle (UAV) operations, Light Detection and Ranging (LiDAR), and Photogrammetry. These digital mappings represent the initial phase in the

* mgr inż. arch., Politechnika Warszawska, Szkoła Doktorska
** dr hab. inż. arch., Politechnika Warszawska, Wydział Architektury

* M.Sc. Eng. Arch., Ph.D., Warsaw University of Technology, Doctoral School
** Ph.D. D.Sc. Eng. Arch., Warsaw University of Technology, Faculty of Architecture

Cytowanie / Citation: Argasiński K., Koszewski K. Semantic Segmentation as the Essence of Heritage Building Information Modelling. *Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation* 2025, 82:124–139

Otrzymano / Received: 16.03.2025 • **Zaakceptowano / Accepted:** 2.05.2025

doi: 10.48234/WK82ESSENCE

Praca dopuszczona do druku po recenzjach

Article accepted for publishing after reviews

LIDAR (*Light Detection and Ranging*) czy też fotogrametria. Wspomniane odwzorowania to pierwszy krok do tworzenia cyfrowych bliźniaków obiektów zabytkowych, niosących z sobą ogromny potencjał w procesie zarówno projektowania, jak i zarządzania dziedzictwem, a także jego monitorowania. W wielu wypadkach odwzorowanie samej geometrii, której pierwotny nośnik to chmura punktów, jest utożsamiane z cyfrowym bliźniakiem obiektu. Zaznaczyć należy jednak, że pojęcie cyfrowego bliźniaka (*digital twin*) opiera się na co najmniej trzech komponentach: obiekcie w świecie fizycznym, jego wirtualnym, cyfrowym odpowiedniku oraz warstwie połączeń między nimi. Można wyróżnić trzy poziomy integracji cyfrowego odwzorowania: cyfrowy model (*digital model*), gdzie trudno mówić o cyfrowym bliźniaku, nie ma bowiem automatycznego połączenia między obiektem a modelem; cyfrowy cień (*digital shadow*), gdzie informacja przepływa ze świata fizycznego do cyfrowego (umożliwiając na przykład symulacje), oraz cyfrowy bliźniak (*digital twin*) [Borkowski, Olszewska 2024], gdzie ten przepływ jest dwustronny (dając możliwość działań w świecie fizycznym na podstawie analiz prowadzonych w cyfrowym odpowiedniku) [Botín-Sanabria et al. 2022]. Łatwo dostrzec, że w wypadku dziedzictwa nadal rzadko mamy do czynienia z pełnoprawnymi cyfrowymi bliźniakami, oferującymi potencjał dynamicznego połączenia cyfrowej repliki z pierwowzorem. Zdarza się też, że mianem cyfrowego bliźniaka określane są wirtualne kopie rzeczywistości fizycznej [Štroner, Křemen, Urban 2022]. Coraz częściej jednak cyfrowe modele, będące na przykład podstawą do tworzenia wirtualnych wycieczek lub działalności dydaktycznej [Kuśnierz-Krupa et al. 2021], zapewniających doświadczenia (choć głównie wizualne) bliskie rzeczywistości fizycznej, postrzegane są w perspektywie ich rozwoju w kierunku cyfrowych bliźniaków [Gabellone 2022], zintegrowanych np. w modelu *smart city*.

Zasadniczym aspektem umożliwiającym wykorzystanie wirtualnych modeli opartych na odwzorowaniu cech przestrzennych jako cyfrowych bliźniaków jest ich wzbogacenie semantyczne.

Kodowanie znaczenia w cyfrowych modelach dziedzictwa

Dwustronny przepływ informacji między obiektem fizycznym a jego wirtualnym odpowiednikiem, istotny z perspektywy koncepcji cyfrowego bliźniaka w kontekście projektowania i zarządzania, nie jest jednak jego jedyną cechą konstytuującą. Ów bliźniak musi być bowiem tak przygotowany, by w możliwie najpełniejszy sposób reprezentował swój fizyczny odpowiednik. Reprezentacja ta – cyfrowy model – nie może ograniczać się do geometrii, czyli cech przestrzennych, lecz powinna zawierać także największy możliwy zakres kluczowych dla obiektu informacji,

development of digital twins of historical sites and hold significant potential for design, management, and monitoring in the heritage domain. In many cases, the delineation of geometry—most often through point clouds—is treated as a digital representation of the physical object. However, it is essential to recognize that the concept of the digital twin encompasses at least three core components: a physical object, its virtual digital counterpart, and a layer of interconnectivity between the two. Three levels of integration can be distinguished in digital mapping processes. The first level, the digital model, does not enable the application of the digital twin concept, as there is no automatic or dynamic connection between the object and the model. The second level, referred to as the digital shadow, allows for a one-directional flow of information from the physical to the digital domain, facilitating applications such as simulation. The third and most advanced level is the digital twin, characterized by bidirectional data flow, thereby enabling actions in the physical world to be informed by analyses conducted in the digital counterpart [Borkowski, Olszewska 2024; Botín-Sanabria et al. 2022]. In the context of cultural heritage, fully operational digital twins—capable of dynamically and legally reproducing their physical counterparts—remain relatively rare. The term “digital twin” is frequently employed to describe virtual replicas of physical entities [Štroner, Křemen, and Urban 2022], even when such replicas lack the full functionality of a true digital twin. Nevertheless, an increasing number of digital models serve, for example, as foundational elements for virtual tours and educational initiatives [Kuśnierz-Krupa et al. 2021]. The experiences they offer, which simulate closeness to the physical world—is being explored also within the context of digital twin development [Gabellone 2022], including their integration into smart city frameworks.

The effective application of virtual models as digital twins, particularly those based on spatial characteristics, is contingent upon the enrichment of their semantic content.

Encoding meaning in digital heritage models

While the bidirectional flow of information between a physical object and its virtual counterpart constitutes a fundamental aspect of the digital twin concept—particularly in the domains of design and management—it is not the only defining feature of it. To adequately represent its physical referent, the digital twin must be comprehensively developed. This representation, rendered as a digital model, cannot be limited to geometry or spatial attributes alone. Rather, it must incorporate a broad spectrum of significant information pertaining to the object, especially those features that are most consequential in defining its character. In the case of heritage monuments, such defining features are closely tied to meaning, as it is precisely this dimension that renders a monument valuable and worthy of preservation for future generations. The absence of a semantic layer—culturally embedded in the physical form—produces a digital representation that is incom-

w tym te najważniejsze z punktu widzenia jego charakteru. W wypadku zabytku takie cechy koncentrują się wokół jego znaczenia, ponieważ to właśnie ono jest tym, co czyni zabytek wartością, którą chcemy przekazać następnym pokoleniom. Bez warstwy semantycznej, zakodowanej kulturowo w fizycznej formie, cyfrowe odwzorowanie zabytku będzie niepełne, pozbawione cech, które czynią jego fizyczny odpowiednik cennym. Wynika stąd, że ów cyfrowy model, jeśli ma sprostać oczekiwaniom jak najwerniejszego odwzorowania oryginału, musi być także nośnikiem wspomnianych znaczeń, zarówno jako całość, jak i – w szczególności – jako jego elementy. Aby móc to znaczenie odpowiednio przypisać, trzeba te elementy zidentyfikować i wyróżnić przez segmentację modelu, zaś kluczem do jej przeprowadzenia będzie właśnie nadawanie elementom znaczenia przez odwołanie się od ich warstwy semantycznej obecnej w obiekcie rzeczywistym. A zatem z samego charakteru modelowanego obiektu – jako zabytku – wynika konieczność stworzenia warstwy znaczeniowej i przypisania do niej poszczególnych elementów modelu. Takie podejście identyfikuje semantyczną segmentację nie tylko jako opisywaną przez wielu badaczy metodę reprezentacji wiedzy [Bevilacqua et al. 2022; Bruno, Roncella 2019; Croce et al. 2021; Yang et al. 2020], ale także jako cechę konstytutywną zapisu przestrzennej informacji o zabytku. Co więcej, dotyczy to nie tylko tzw. wiedzy jawnej (*explicit knowledge*), z charakteru zabytku jako dobra kultury wynika bowiem także konieczność zapisu tzw. cichej wiedzy (*tacit knowledge*) [Nofal et al. 2018]. Oczywiście cyfrowa reprezentacja obiektu ograniczona do jego cech przestrzennych (geometrii) nie jest bezwartościowa, można jednak jej znaczenie porównać do analogowej fotografii pozbawionej jakiegokolwiek opisu. Większość korzyści wynikających z charakterystyki cyfrowego medium – według Lwa Manovicha: reprezentacja numeryczna, modularność, automatyzacja, wariacyjność i transkodowanie [Manovich 2001] – jest wówczas mocno okrojona, jeśli w ogóle obecna.

Rola i źródła semantycznej segmentacji

W pracy z cyfrowymi modelami zabytków i we wzbogacaniu ich o warstwę znaczeniową konieczne jest podejście systemowe, przejawiające się zarówno na poziomie opisu obiektów, uczestników procesów i samych procesów, ich właściwości i relacji, umożliwiającego zarządzanie nimi – czyli ontologii, jak i na poziomie elementów obiektu, odnoszącym się do efektywnej i zgodnej z konotacją znaczeniową segmentacji – gdzie potrzebne są odpowiednie taksonomie. W wypadku ontologii istnieją standardy z zakresu dziedzictwa kulturowego, do których odnoszą się badacze dziedzictwa architektonicznego, takie jak choćby standard ISO 21127: CIDOC CRM (*Conceptual Reference Model*) [Agathos et al. 2022], pełniący funkcję ontologii refe-

plete and devoid of the attributes that confer value upon its material counterpart. Thus, for such a digital model to fulfill the expectation of closely replicating the original, it must also function as a vessel for conveying these meanings, both in its entirety and through its constituent parts. To effectively ascribe meaning to individual components, the model must undergo segmentation. This process entails identifying and distinguishing discrete elements by referencing the semantic content present in the original physical object. Consequently, when the modeled object is a monument, it becomes necessary to construct a semantic layer and associate specific elements of the model with it. Within this framework, semantic segmentation emerges not only as a method of knowledge representation—described by numerous scholars [Bevilacqua et al. 2022; Bruno, Roncella 2019; Croce et al. 2021; Yang et al. 2020]—but also as a constitutive aspect of spatial data acquisition for cultural heritage documentation. Moreover, this principle extends beyond the domain of explicit knowledge. The inherent value of a monument as a cultural artifact reinforces the imperative to preserve and document tacit knowledge as well [Nofal et al. 2018]. Of course, a digital representation limited solely to spatial properties (i.e., geometry) is not worthless; its informational content is however akin to that of an analog photograph lacking any descriptive context. The distinctive affordances of digital media, as named by Lev Manovich—numerical representation, modularity, automation, variability, and transcoding [Manovich 2001]—are often substantially reduced or even absent when semantic enrichment is neglected.

The role and sources of semantic segmentation

In working with digital models of monuments and enriching them with semantic layers, a systems-based approach is essential. This approach must operate on two interrelated levels: first, at the level of describing objects, participants, processes, their properties, and interrelations—facilitating their management through ontologies; and second, at the level of individual object components—requiring effective segmentation aligned with semantic connotations, for which appropriate taxonomies are indispensable. In the domain of ontologies, there exist established cultural heritage standards frequently referenced by architectural heritage researchers. One such standard is ISO 21127: CIDOC CRM (Conceptual Reference Model) [Agathos et al. 2022], which serves as a foundational reference ontology [Kuroczyński 2017]. These ontologies also underpin current efforts aimed at their integration into workflows for the creation of digital twins of monuments [Niccolucci, Felicetti, Hermon 2022; Niccolucci et al. 2023].

The concept of semantic segmentation originates in digital image analysis. In this context, it refers to the process of assigning semantic labels to individual pixels, thereby grouping them into structures that correspond to recognizable objects. These structures, once delineated, can be semantically described. More broadly, semantic

rencyjnej [Kuroczyński 2017]. Są one także podstawą do ciągłych prac mających na celu ich ściślejsze zintegrowanie z procesami tworzenia cyfrowych bliźniaków zabytków [Niccolucci, Felicetti, Hermon 2022; Niccolucci et al. 2023].

Pojęcie semantycznej segmentacji jest związane z cyfrową analizą obrazu i w tym kontekście odnosi się do przypisywania pojedynczym pikselom odpowiednich etykiet, pozwalających grupować je w reprezentacje obiektów dających się ująć w semantycznym opisie – innymi słowy dających się zgrupować w struktury, którym można przypisać znaczenie. W szerszym sensie pojęcie semantycznej segmentacji można odnieść do kognitywistyki, jako opisujące systematyzację i kategoryzację obiektów podczas procesu percepcji konieczną do zrozumienia treści obrazu. W istocie bowiem badane procesy percepcji, opisujące rozpoznawanie obiektów, którym towarzyszy ich kategoryzacja [Riesenhuber, Poggio 1999], stały się podstawą do numerycznej analizy obrazu i modelowania tych procesów przy użyciu systemów cyfrowych [Ross, Oliva 2010], które z kolei znalazły zastosowanie w uczeniu maszynowym służącym rozpoznawaniu obrazów [Ulku, Akagündüz 2022]. Metody i narzędzia do analizy obrazu dadzą się zastosować także do automatycznej segmentacji semantycznej chmur punktów – jest to obszar intensywnych badań i eksperymentów, także na polu dziedzictwa architektonicznego w odniesieniu do automatyzacji tworzenia cyfrowych modeli o bogatej warstwie znaczeniowej [Croce et al. 2021; Gil et al. 2024; Pierdicca et al. 2020].

Rola taksonomii w kodowaniu semantyki

W celu skutecznego przeprowadzenia semantycznej segmentacji konieczna jest odpowiednia klasyfikacja elementów obiektu. W wypadku zabytków architektury taksonomia opisująca elementy i ich hierarchiczne relacje jest bardzo trudna do zbudowania, sama zaś natura obiektów, pochodzących z przeszłości i z zasady unikatowych, zadania tego nie ułatwia. Z tej ostatniej przesłanki wynika wręcz, że stworzenie uniwersalnej taksonomii, często z konieczności opierającej się na ówczesnych technikach budowania, a przynajmniej je uwzględniającej, jest niemożliwe. W istocie istniejące taksonomie opisujące elementy składowe budynków odnoszą się głównie do współczesnych obiektów, opierając się na standaryzacji produkowanych elementów. Mimo wspomnianych trudności, wynikających ze skomplikowanej i wieloaspektowej natury zabytków, podejmowane są próby systematyzacji, każda bowiem teoria opisująca wewnętrznie zróżnicowany fragment rzeczywistości, starająca się wyjaśnić, opisać, zrozumieć i umożliwić analizę opisywanych fenomenów, musi się taką taksonomią posługiwać i musi to robić w sposób metodycznie poprawny, co stanowi ogromne wyzwanie w każdej dziedzinie. Konieczność precyzyjnego operowania terminologią zaowocowała

segmentation may be understood as a cognitive process that systematizes and categorizes visual input during perception—an essential step in image comprehension. Indeed, perceptual processes involving object recognition and categorization, as described in cognitive science literature [Riesenhuber, Poggio 1999], have informed computational image analysis and inspired their modeling within digital systems [Ross, Oliva 2010]. These insights, in turn, have contributed to the development of machine learning methods for visual recognition tasks [Ülkü, Akagündüz 2022]. The techniques and tools developed for image analysis have also been adapted to the automatic semantic segmentation of point clouds. This area of research is currently undergoing intensive development, including the field of architectural heritage. The overarching goal is to automate the generation of digital models enriched with semantically meaningful layers [Croce et al. 2021; Gil et al. 2024; Pierdicca et al. 2020].

The role of taxonomy in encoding semantics

Effective semantic segmentation requires the accurate classification of an object's constituent elements. Constructing a taxonomy that reflects the elements and their hierarchical relationships in the context of architectural monuments poses considerable challenges. This complexity is further exacerbated by the intrinsic uniqueness and historical specificity of such objects. Consequently, it can be inferred that the formulation of a universal taxonomy—especially one compatible with historical construction methods—is largely unfeasible. Existing taxonomies pertaining to building components are predominantly oriented toward contemporary architecture and depend heavily on the standardization of prefabricated elements. Despite these difficulties, efforts toward systematization are being undertaken. As with any theoretical framework addressing a heterogeneous segment of reality, such taxonomies seek to explain, describe, and support the interpretation and analysis of architectural phenomena. This task is particularly demanding, as taxonomies must be employed in a methodologically rigorous manner. The need for terminological precision has, among other developments, led to the creation of structured thesauri that define consistent vocabularies and articulate conceptual relationships—such as the *Art and Architecture Thesaurus* developed by the Getty Research Institute. These, however, function primarily as controlled vocabularies and tend to encompass a broader conceptual scope than the components of buildings alone. A more structured data framework is provided by the CIDOC CRM (Conceptual Reference Model) standard, which has been under continuous development since 2006. It focuses on formalizing ontological relationships among people, objects, and activities, thereby enabling a systematic representation of knowledge across the cultural heritage domain. CIDOC CRM finds applications in heritage research and in the generation of hypothetical virtual reconstructions. However, as a data model, it does not incorporate a standardized architectural taxonomy.

m.in. tworzeniem tezaurusów definiujących spójną terminologię i porządkujących relacje między pojęciami (np. opracowany przez Getty Research Institute *Art and Architecture Thesaurus*). Są to jednak przede wszystkim słowniki, obejmujące zresztą dużo szerszy zakres pojęć niż elementy budynku. Swoistą strukturę danych – model referencyjny, który można wypełnić, sięgając do taksonomii – oferuje wspomniany standard CIDOC CRM (od 2006 r. stale rozwijany), który koncentruje się na ontologicznych relacjach pomiędzy osobami, obiektami i aktywnościami, tworząc system formalizujący wiedzę dotyczącą, w założeniu, całości dziedzictwa kulturowego. CIDOC CRM znajduje zastosowanie w badaniach dziedzictwa oraz w procesie tworzenia hipotetycznych wirtualnych rekonstrukcji, jednak jako model danych nie zawiera w sobie standardu architektonicznej taksonomii.

Wobec braku standardu odnoszącego się do historycznej architektury często stosowanym podejściem jest tworzenie lokalnej taksonomii na potrzeby danego projektu czy też specyficznej grupy obiektów na zasadzie *bottom-up* [Oreni et al. 2014]. Z reguły towarzyszy temu próba kreowania biblioteki elementów możliwych do szerszego użycia. W istocie jest to metoda *ad-hoc* stosowana w wielu wypadkach budowania taksonomii, polegająca na wyjściu od artefaktów i generalizacji ich cech, czyli na rozumowaniu redukcyjnym. Najczęstszym generalnym kryterium klasyfikującym jest funkcja strukturalna elementu (np. podział na elementy konstrukcyjne i niekonstrukcyjne).

W ujęciu historycznym odniesienia do prostej taksonomii określającej elementy budynków można znaleźć już u Witruwiusza, ale także – w powiązaniu z tektoniką budynków – u Karla Böttichera i Gottfrieda Sempera, a współcześnie u Roberta Venturiego i Denise Scott-Brown, czy też w próbie podejścia systemowego Christophera Alexandra. Konieczność systematyzacji, a co za tym idzie, odpowiednie klasyfikacje elementów budynku, wywodzą się obecnie także z domeny produkcji przemysłowej, w szczególności z prefabrykacji, odnosząc się jednak, co oczywiste, do budynków wznoszonych współcześnie. Tworzone są lokalnie przez instytucje publiczne czy organizacje na potrzeby przemysłu budowlanego i organizacji procesu inwestycyjnego (SfB, BSAB w Szwecji, CI/SfB, Uniclass w Wielkiej Brytanii, Building 90 w Finlandii, OmniClass czy UniFormat w USA, MasterFormat w USA i Kanadzie, a także norma ISO 81346-2). Przykładem standardu produktów przemysłowych będącego źródłem większości późniejszych jest STEP (*Standard for the Exchange of Product model data*), wprowadzony jako ISO 10303, którego początki sięgają lat 90. XX w. Istnieją też takie taksonomie, które odnoszą się do klasyfikacji budynków jako takich, posługując się ich typologiami, bądź takie, które starają się porządkować całą domenę architektury, odnosząc się do jej sfery conceptualnej, jednak ich analiza wykracza poza ramy niniejszego artykułu.

In the absence of a dedicated standard for historic architecture, a widely adopted practice involves the creation of project-specific or object-specific taxonomies through bottom-up approaches [Oreni et al. 2014]. This is frequently accompanied by the development of reusable libraries of architectural elements. These taxonomies are often generated ad hoc, using reductive reasoning that begins with artifacts and generalizes their features. A common classification criterion in such cases is the structural function of an element—typically dividing components into structural and non-structural categories.

A review of historical sources reveals that rudimentary classification systems can be traced back to Vitruvius. The systematic taxonomies in the context of architectural tectonics appear in the works of Karl Bötticher and Gottfried Semper. Modern contributions to the classification of architectural elements can be found in the writings of Robert Venturi and Denise Scott Brown, as well as in Christopher Alexander's systems-oriented framework. The need for systematization and element classification has also emerged from the context of industrialized construction, particularly prefabrication. Nonetheless, these taxonomies primarily concern contemporary construction and are typically developed by public institutions or professional organizations to meet the demands of the construction industry and to streamline the building process. Examples of such classification systems include SfB and BSAB in Sweden, CI/SfB and Uniclass in the United Kingdom, Building 90 in Finland, OmniClass and UniFormat in the United States, MasterFormat in North America, and the ISO 81346-2 standard. One of the earliest and most influential standards for product data modeling in construction is STEP (Standard for the Exchange of Product model data), formalized as ISO 10303, with origins dating back to the 1990s. Beyond the element-based taxonomies discussed above, there also exist taxonomic frameworks aimed at building classification based on typologies, or at systematizing the broader conceptual domain of architecture. However, these broader classifications fall outside the scope of the present discussion.

Semantic enrichment of digital models

Building Information Modeling (BIM) provides a robust platform for the documentation and management of cultural heritage assets. However, its application within the heritage domain is often hindered by limitations in semantic interoperability and the complexity of culturally significant data [Koszewski, Franczuk, Argasiński 2021]. These challenges constrain the ability of BIM to fully accommodate the nuanced informational needs specific to heritage contexts.

A contemporary tool designed to address semantic interoperability within the BIM environment is the *buildingSMART Data Dictionary* (bSDD) [2025]. This platform facilitates the integration and utilization of standardized data dictionaries within heritage documentation workflows. Incorporating heritage assets into BIM environments enables a comprehensive, structured, and

Semantyczne wzbogacenie modeli cyfrowych

Modelowanie informacji o budynku (BIM, *Building Information Modelling*) oferuje doskonałą platformę do dokumentacji i zarządzania zasobami dziedzictwa kulturowego. Jednak ograniczenia interoperacyjności semantycznej i złożoność danych istotnych kulturowo często ograniczają efektywność BIM w kontekście dziedzictwa kulturowego [Koszewski, Franczuk, Argasiński 2021].

Jednym ze współczesnych narzędzi ułatwiających standardy interoperacyjności semantycznej w BIM jest słownik danych *buildingSMART Data Dictionary* (bSDD) [2025]. Umożliwia on także wykorzystanie słowników danych w procesie dokumentacji obiektów dziedzictwa kulturowego. Integracja zasobów dziedzictwa w ramach BIM zapewnia kompleksową i dostępną reprezentację, wspierając procesy dokumentacji i analizy. W kontekście opracowywania standardów dla złożonych projektów renowacji i konserwacji słowniki te ułatwiają tworzenie znormalizowanych etykiet obiektów i jednoznaczne przypisywanie informacji, zwiększając w ten sposób interoperacyjność i wspierając zarządzanie danymi historycznymi.

Wykorzystanie słowników danych takich jak bSDD ułatwia precyzyjny opis obiektów przez użycie ustalonych standardów terminologicznych, eliminując w ten sposób niejednoznaczność w interpretacji i wspierając współpracę między zespołami architektów i konserwatorów. Wzbogacenie semantyczne modeli BIM ułatwia również automatyczną klasyfikację i wyszukiwanie danych, co jest szczególnie ważne w obszarach takich jak wirtualna rekonstrukcja lub digitalizacja dziedzictwa kulturowego. Standaryzacja reprezentacji kontekstu historycznego i struktury samego obiektu może stworzyć podstawę do skutecznych działań konserwatorskich.

Segmentacja chmur punktów a praktyka HBIM

Proces mapowania geometrii obiektów dziedzictwa stanowi początkowy, niemniej bardzo ważny etap tworzenia cyfrowych modeli zabytków, które mają na celu ujęcie pełnego kontekstu historycznego i konserwatorskiego. Jak wspomniano, w celu zagwarantowania skutecznego zarządzania informacjami i przejrzystości w kontekście ochrony dziedzictwa konieczne jest uzupełnienie tych modeli warstwą semantyczną [Argasiński, Kuroczyński 2023]. Przypisanie odpowiednich atrybutów semantycznych umożliwia tworzenie cyfrowych modeli, które wiernie odzwierciedlają oryginalne znaczenie i rolę poszczególnych elementów w strukturze budynku. Polega to na stworzeniu semantycznej warstwy informacyjnej, co może być realizowane przy użyciu metodyki HBIM (*Heritage Building Information Modeling*) w sposób zgodny z oryginalną ideą zastosowania BIM, zakładającą wzbogacenie infor-

accessible representation of architectural monuments, thus supporting both documentation and analytical processes. In the context of developing standards for complex conservation and restoration projects, data dictionaries such as bSDD play a critical role. They support the generation of standardized object descriptors and allow for the unambiguous association of semantic information, thereby enhancing interoperability and supporting the consistent management of historical data.

The use of structured dictionaries ensures terminological precision in the characterization of heritage elements, reducing interpretative ambiguity and promoting collaboration among interdisciplinary teams—including architects, conservators, and researchers. Semantic enrichment of BIM models enables automated classification and efficient data retrieval, which is of particular significance in digital reconstruction and heritage digitization initiatives. Furthermore, standardizing the representation of an object's historical context and structural composition provides a foundational framework for informed and effective conservation strategies.

Point cloud segmentation vs. HBIM practice

The process of mapping the geometry of heritage assets represents an initial yet pivotal phase in the development of digital models of monuments that aim to encapsulate not only spatial data but also the broader historical and conservation context. As previously noted, effective information management and transparency in the preservation of heritage necessitate the augmentation of geometric models with a semantic layer [Argasiński, Kuroczyński 2023]. The inclusion of appropriate semantic attributes allows for the creation of digital representations that reflect the original function and significance of individual architectural elements within the building's structure. This augmentation requires the establishment of a semantic information layer, which can be achieved through the application of the Heritage Building Information Modeling (HBIM) methodology, grounded in the core principles of BIM. HBIM involves enriching geometric information with additional layers of descriptive, functional, and contextual data. In practice, this objective is realized by integrating geometric data obtained through spatial registration techniques with relevant taxonomies and ontologies within the BIM environment. This integration serves to define the conservation functions and attributes of the data while also articulating its semantic and cultural dimensions [Kuroczyński et al. 2023]. Achieving this level of integration relies on the use of heritage-specific semantic frameworks, such as the mentioned CIDOC CRM, which supports the systematic encoding of object-related information. The semantic layer is instrumental in enhancing the value of digital heritage models, as it not only supports preservation but also facilitates the analysis and interpretation of data within historical and cultural frameworks [Niccolucci, Felicetti, Hermon 2022].

macji geometrycznej o inne warstwy informacyjne. W praktyce stosowania HBIM osiąga się to przez integrację danych geometrycznych uzyskanych za pomocą technik rejestracji przestrzennej z odpowiednimi taksonomiami i ontologiami przeniesionymi na grunt BIM, definiującymi funkcję i charakterystykę danych w ujęciu konserwatorskim, ale również jego konteksty semantyczne i kulturowe [Kuroczyński et al. 2023]. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu ontologii i taksonomii specyficznych dla dziedzictwa kulturowego, takich jak wspomniany wcześniej standard CIDOC CRM, pozwalających na metodyczne kodowanie informacji o obiekcie. Semantyczna warstwa modelu cyfrowego stanowi o jego wartości, umożliwiając nie tylko zachowanie, ale również analizę i interpretację danych w wymiarze historycznym i kulturowym [Niccolucci, Felicetti, Hermon 2022].

Automatyzacja segmentacji chmur punktów

Jednym z głównych wyzwań w dokumentowaniu dziedzictwa jest przekształcanie surowych danych w ustrukturyzowane elementy modelu BIM, co wymaga uwzględnienia aspektów zarówno technicznych, jak i semantycznych. Proces segmentacji chmur punktów stanowi etap najważniejszy, ponieważ musi nie tylko grupować punkty w logicznie uzasadnione zestawy (np. ściany, sklepienia, detale architektoniczne), lecz także uwzględniać nieregularność i uszkodzenia charakterystyczne dla zabytkowych budynków.

Wśród tradycyjnych metod warto wymienić segmentację *region-growing*, polegającą na łączeniu punktów w obszary na podstawie podobieństwa właściwości, oraz dopasowanie modelu z wykorzystaniem metody RANSAC (*Random Sample Consensus*), która iteracyjnie wyodrębnia i dopasowuje modele do podzbiorów danych.

Choć podejścia te sprawdzają się dla prostych kształtów, to w obliczu większej złożoności i nieregularności należy rozważyć użycie algorytmów uczenia maszynowego, takich jak Random Forest (klasyfikator ansamblowy oparty na drzewach decyzyjnych) [Gil et al. 2024]. Z kolei metody głębokiego uczenia, wykorzystujące PointNet++ oraz DGCNN (*Dynamic Graph Convolutional Neural Networks*), przetwarzające relacje między punktami za pomocą sieci konwolucyjnych, umożliwiają precyzyjną segmentację oraz klasyfikację nawet silnie uszkodzonych i nieregularnych powierzchni [Haznedar et al. 2023].

Każda z tych metod ma swoje zastosowanie, ale dopiero integracja wyników ich użycia pozwala na stworzenie spójnego i funkcjonalnego modelu cyfrowego, który może być efektywnie wykorzystany w różnych aspektach zarządzania dziedzictwem kulturowym. Należy jednak stwierdzić, że pomimo zaawansowania technologicznego nie istnieje jeszcze w pełni automatyczna ścieżka, która przetworzyłaby dane pomiarowe obiektu zabytkowego w sposób spełniający założenia zachowania

Automation of point cloud segmentation

One of the principal challenges in the documentation of cultural heritage lies in the transformation of raw survey data into structured BIM elements. This process demands careful consideration of both technical and semantic dimensions. At the core of this transformation is the segmentation of point clouds—an essential step that involves grouping discrete points into meaningful spatial entities such as walls, vaults, or architectural details. This process must also account for the inherent irregularities, deformations, and damage commonly found in historic structures.

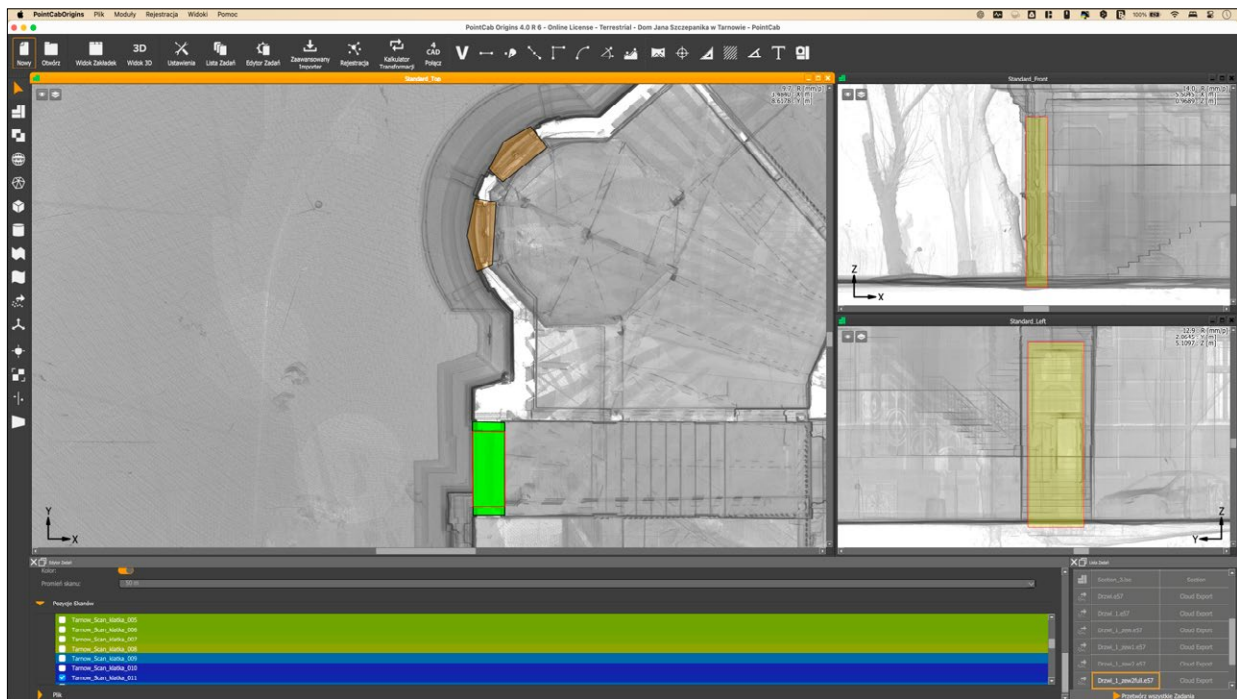
Among conventional segmentation techniques, region-growing segmentation is particularly noteworthy. This method groups points into regions based on shared properties, such as spatial proximity or surface orientation. Complementary to this approach is model fitting using the Random Sample Consensus (RANSAC) algorithm—an iterative procedure that identifies and fits geometric primitives to subsets of the data.

While these methods perform adequately in the case of relatively simple and regular geometries, they fall short when applied to complex, deteriorated, or irregular shapes typical of heritage structures. For such cases, the adoption of machine learning algorithms has been proposed. Notably, ensemble classifiers such as Random Forest—based on decision trees—offer improved classification performance in heterogeneous datasets [Gil et al., 2024]. Deep learning approaches, including PointNet++ and Dynamic Graph Convolutional Neural Networks (DGCNN), have demonstrated high precision in the segmentation and classification of surfaces that exhibit extensive corruption and structural irregularities [Haznedar et al., 2023].

Each of these methods offers distinct advantages, yet a coherent and operational digital model suitable for use in heritage conservation and management can only be achieved through the integrated application of multiple techniques. Nevertheless, it is important to acknowledge that, despite ongoing technological advancements, no fully automated method currently exists that meets all the critical criteria of heritage documentation: maximum data retention, semantic enrichment, and efficient data processing.

Manual methods of point cloud segmentation

Despite significant advancements in modeling automation, manual segmentation remains the preferred method in the management of architectural heritage assets. This preference is primarily due to the essential role of expert knowledge held by conservation teams, who possess an in-depth understanding of the specific characteristics of the historic structure under study. Architectural heritage resources often exhibit a high degree of complexity, irregularity, and historical specificity, which necessitate detailed and context-sensitive analysis.



Ryc. 1. Segmentacja manualna elementów architektonicznych w oprogramowaniu PointCab Origins 3D; autorem wszystkich grafik jest K. Argasiński

Fig. 1. Manual segmentation of architectural elements in PointCab Origins 3D software; the author of all graphics is K. Argasiński

jak największej ilości informacji, wzbogacenia semantycznego i ekonomiki przetwarzania danych.

Metody manualne segmentacji chmur punktów

Pomimo postępu automatyzacji modelowania ręczna segmentacja utrzymuje swoją pozycję jako preferowane podejście w kontekście zarządzania zasobami dziedzictwa architektonicznego. Wynika to przede wszystkim z wiedzy eksperckiej o konkretnym obiekcie, nad którym pracuje zespół konserwatorski. Zasoby dziedzictwa architektonicznego mają często złożone i trudno uchwytnie cechy, które wymagają precyzyjnej i zniuansowanej analizy. Eksperti w dziedzinie konserwacji, historycy sztuki oraz badacze posiadają dogłębną wiedzę na temat historii architektury, stylów i kulturowego znaczenia poszczególnych elementów, co jest kluczowe dla rzetelnej segmentacji tych obiektów [Alshawabkeh, Baik 2023]. Dodatkowo niejednorodny poziom jakości danych pozyskiwanych z chmur punktów wymaga elastyczności, którą najlepiej zapewnia ręczna segmentacja. Opracowujący dane może dostosowywać swoje podejście w zależności od specyficznych wyzwań związanych z ich jakością, co jest trudne do osiągnięcia w pełni automatycznymi metodami. Ręczna segmentacja pozwala także na iteracyjną kontrolę jakości i walidację wyników, co jest kluczowe dla utrzymania dużej dokładności i wiarygodności danych.

Korzyści i wyzwania zastosowania Heritage BIM

Korzyści płynące z zastosowania modelowania informacji o budynkach (BIM) w kontekście branż

Experts such as preservation specialists, architectural historians, and researchers bring specialized knowledge of architectural styles, construction techniques, and the cultural significance of individual elements—expertise that is indispensable for the reliable segmentation and interpretation of heritage objects [Alshawabkeh, Baik 2023]. Their ability to interpret the built fabric within broader historical and cultural frameworks allows for a level of precision and discernment that current automated methods are yet to fully replicate. Moreover, the heterogeneous quality of point cloud data—resulting from variations in material condition, lighting, occlusions, or recording technique—demands a degree of flexibility that is best accommodated through manual segmentation. The human operator can dynamically adapt their approach to accommodate data anomalies, something that automated systems struggle to handle effectively. Manual segmentation also enables iterative quality control and continuous validation of outputs, which is crucial for ensuring the accuracy, consistency, and interpretability of the final digital model.

Advantages and challenges of using Heritage BIM

The advantages of employing Building Information Modeling within AECO sector are now widely acknowledged. However, in the context of historic buildings, the application of BIM must be extended beyond conventional construction practices to incorporate historical and cultural dimensions—an approach commonly referred to as Heritage BIM HBIM. The complexity inherent in preservation, restoration, and rehabilitation processes pre-



Ryc. 2. Proponowana ścieżka tworzenia modelu Heritage BIM w oparciu o skaning laserowy; proces bierze pod uwagę segmentację manualną chmury punktów obiektów ważnych w kontekście inwentaryzacji

Fig. 2. Proposed simplified workflow for creating Heritage BIM model based on laser scanning; the process takes into account manual segmentation of the point cloud of objects important in the context of the inventory

budowlanych (AECO – *Architecture, Engineering, Construction, Operations*) są już szeroko uznane. Niemniej w projektach związanych z obiektami zabytkowymi zastosowanie BIM w celu tworzenia ich modeli powinno zostać poszerzone o wątki historyczne (Heritage BIM). Złożoność procesów takich jak konserwacja, renowacja czy restytucja sprawia, że kategoryzacja działań związanych z HBIM staje się wyzwaniem [Gabellone 2022]. Istnieją obszary stanowiące otwarte pole do interpretacji, jeśli chodzi o adaptację, konserwację zapobiegawczą, zarządzanie dziedzictwem, interpretację, dokumentację i badania [Bevilacqua et al. 2022]. W przeciwieństwie do powszechnego stosowania BIM w budownictwie ogólnym HBIM jest stosunkowo nowym obszarem badań, o mniejszej popularności wśród specjalistów w zakresie konserwacji zabytków. Aby stworzyć model cyfrowy obiektu zabytkowego, potrzebna jest metoda i wynikający z niej system [Nofal et al. 2018], który umożliwi zapis nie tylko geometrii, ale także niezbędnej semantyki. Założenia takie spełnia metodyka BIM, pozwalająca na archiwizowanie różnych rodzajów danych, co ułatwia zarządzanie zasobami zabytkowymi przez integrację cech niematerialnych, takich jak wartość historyczna i znaczenie społeczne.

Przykład zastosowania metodyki Heritage BIM

Opracowanie modelu kamienicy projektu Franciszka Hackbeila młodszego (1879–1921), wzniesionej w latach 1912–1913 przy ul. Chopina w Tarnowie, stanowi przykład zastosowania HBIM. Obiekt ten charakteryzuje się imponującym eklektyczno-secesyjnym wystrojem elewacji, nawiązującym do neobaroku, oraz bogatą dekoracją, wyrażającą się w pilastrach, boniowaniu, attyce, balustradach i wykuszach [Huniak 2017].

Wstępny etap działań polegał na ustaleniu kontekstu historycznego i architektonicznego budynku. Zebranie odpowiednich informacji, w tym danych zawartych w kartach ewidencyjnych zabytku, pozwala na wstępną identyfikację jego istotnych elementów i ocenę ich stanu zachowania. Wiedza ta jest niezbędna do sformułowania odpowiedniego planu działania, w tym określenia celów pomiarowych i ustalenia zakresu prac.

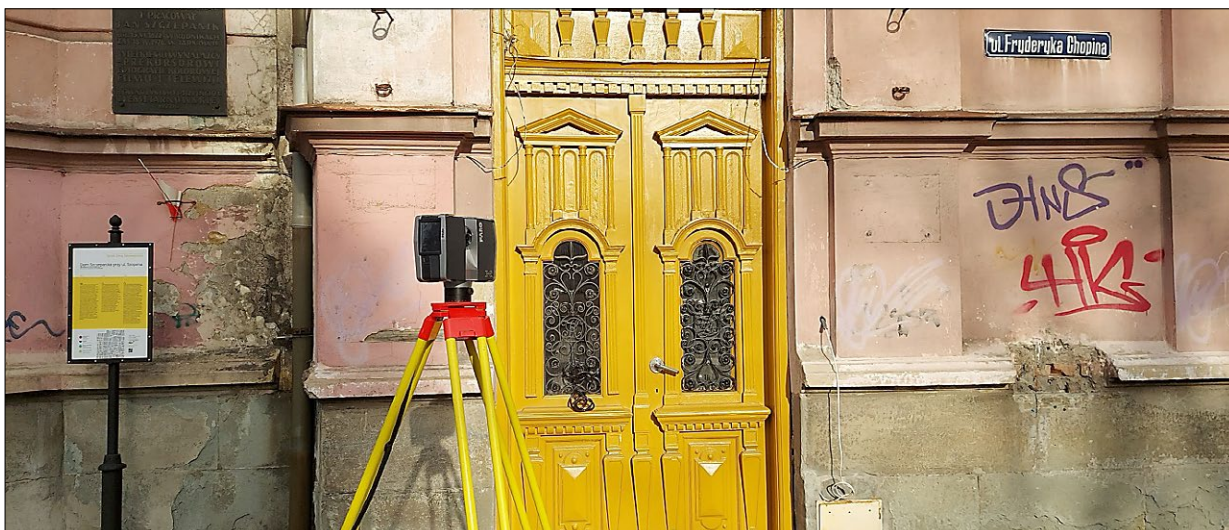
sents considerable challenges in classifying and standardizing HBIM-related activities [Gabellone 2022].

Within domains such as adaptive reuse, preventive maintenance, heritage management, interpretation, documentation, and academic research, the functions and objectives of HBIM can vary significantly, often depending on disciplinary context or institutional priorities [Bevilacqua et al. 2022]. In contrast to the widespread adoption of BIM in contemporary construction projects, HBIM remains a relatively emergent field, characterized by limited uptake among professionals engaged in heritage conservation. The creation of accurate and meaningful digital models of historic structures requires a well-defined methodology and supporting system—both of which have been outlined in earlier research [Nofal et al. 2018]. This approach supports not only the geometric modeling of heritage objects but also their semantic enrichment, which is essential for capturing historical significance, material authenticity, and cultural context. BIM, when adapted for heritage applications, offers a comprehensive framework for addressing these challenges. It facilitates the structured archiving of heterogeneous data types, enhances heritage asset management, and supports interdisciplinary collaboration. By integrating intangible attributes such as historical value and social meaning, HBIM provides a powerful instrument for both the preservation and interpretation of the built environment, contributing to its sustainable conservation and scholarly understanding.

Application of Heritage BIM methodology: Case study

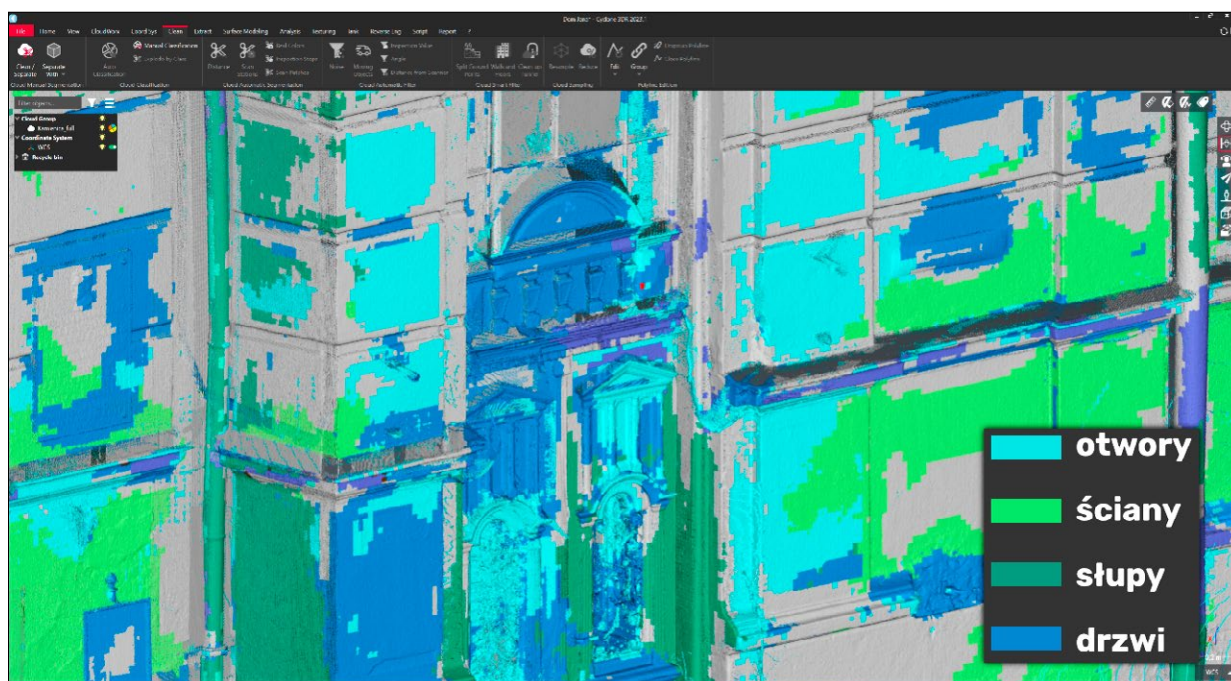
The development of a digital model of a tenement house designed by Franciszek Hackbeil the Younger (1879–1921), constructed between 1912 and 1913 on Chopina Street in Tarnów, serves as a representative case study in the application of HBIM. The building features a striking eclectic–Art Nouveau facade, with stylistic references to Baroque Revival architecture. Its ornamental richness is manifested through architectural elements such as pilasters, rustication, attics, balustrades, and bay windows [Huniak 2017].

The initial stage of the project involved establishing the historical and architectural context of the building. The collection of relevant information—including data from the building's heritage survey record—enabled the



Ryc. 3. Digitalizowany obiekt, fragment kamienicy w Tarnowie, 2023; fot. K. Argasiński

Fig. 3. Digitized object, fragment of a tenement house in Tarnow, 2023; photo by K. Argasiński



Ryc. 4. Próba segmentacji automatycznej z wykorzystaniem oprogramowania Leica Cyclone 3DR

Fig. 4: Automatic segmentation attempt using Leica Cyclone 3DR software

Właściwa faza pozyskiwania danych przestrzennych wymaga skrupulatnego zaplanowania pozycji skanowania w celu zapewnienia kompleksowego pokrycia obiektu i uzyskania bardzo dobrej jakości odwzorowania detali architektonicznych. Wybór odpowiednich pozycji skanera opierał się na analizie głównych obszarów budynku, takich jak fasady ze złożonymi ornamentami, które były szczególnie podatne na błędy rejestracji. W powyższym przykładzie (ryc. 2–3) skaner FARO Focus 3D 120s i S70 został użyty do dokładnego odwzorowania konstrukcji drzwi i sąsiednich elementów, co umożliwiło dalszą precyzyjną segmentację.

preliminary identification of architecturally and historically significant elements and allowed for an initial assessment of their state of preservation. This contextual knowledge was essential for formulating an appropriate action plan, including the definition of measurement objectives and the delineation of the scope of work.

The subsequent phase, focused on spatial data acquisition, required meticulous planning of scanner placement to ensure comprehensive site coverage and high-quality capture of architectural detail. The selection of scanning positions was informed by an analysis of key areas of the building—such as ornamented facades—where the complexity of forms increased the

Kolejna faza, polegająca na rejestracji (połączeniu) surowych danych, zapewnia spójność i dokładność reprezentacji całej struktury. Wiąże się to z precyzyjnym połączeniem danych z poszczególnych skanów w odniesieniu do rzeczywistych pozycji pomiarowych. W praktyce wymaga to integracji składowych chmur punktów pozyskanych pod różnymi kątami w celu minimalizacji skutków przesunięć i zniekształceń. W przedstawionym tutaj studium przypadku pozycjonowanie segmentów fasady w stosunku do drzwi wejściowych miało ogromne znaczenie dla uzyskania wiarygodnego modelu wiernie odzwierciedlającego relacje między różnymi elementami architektonicznymi.

Po scaleniu skanów składowych fasady i atrium kamienicy przeprowadzono zautomatyzowaną próbę segmentacji przy użyciu komercyjnego oprogramowania Leica Cyclone 3DR (ryc. 4). Próba ta miała na celu ocenę skuteczności algorytmów w kontekście złożonej struktury architektonicznej. Wyniki okazały się jednak niezadowalające. Algorytmy nie były w stanie dokładnie wykryć elementów detali architektonicznych różniących się ornamentyką, takich jak ościeżnice czy profile skrzydeł drzwiowych. Dużym wyzwaniem okazała się duża złożoność i nieregularność powierzchni, a także zróżnicowany stan zachowania poszczególnych fragmentów. Brak poprawnej klasyfikacji tych elementów pokazał, że standardowe algorytmy automatycznej segmentacji nie są wystarczająco skuteczne w wypadku obiektów historycznych, których geometria jest niestandardowa, a elementy mogą być zdeformowane lub uszkodzone. Możliwe, że z czasem trenowania algorytmu ML (*machine learning*) na przedstawionym modelu wyniki mogłyby być bardziej zadowalające.

W kontekście analizowanego przykładu – secesyjnych drzwi wejściowych – automatyczne podejście zaowocowało zbyt uogólnioną segmentacją, która traktowała bogato zdobione powierzchnie jako jedną płaszczyznę. Pokazuje to, że w wypadku obiektów o dużym stopniu szczegółowości, takich jak drzwi z detalami rzeźbiarskimi, narzędzia do automatycznej segmentacji wymagają dodatkowego ręcznego wkładu w celu zapewnienia wiarygodności modelu. Analiza ta pokazuje potrzebę dostosowania metod segmentacji do specyfiki zabytków, w których szczegółowość i dokładne odwzorowanie detali mają zasadnicze znaczenie dla ich konserwacji i przyszłej dokumentacji.

Ze względu na złożoność obiektu i niezadowalające wyniki automatycznej segmentacji zdecydowano się w procesie tworzenia modelu na segmentację ręczną w oprogramowaniu PointCab Origins 3D [PointCab Software 2025], pozwalającą na bardziej precyzyjne odwzorowanie skomplikowanych elementów architektonicznych. W tym podejściu operator niezależnie wybiera i klasyfikuje części modelu w oparciu o swoją wiedzę, koncentrując się na tych obszarach, które są najważniejsze z punktu widzenia analizy architekto-

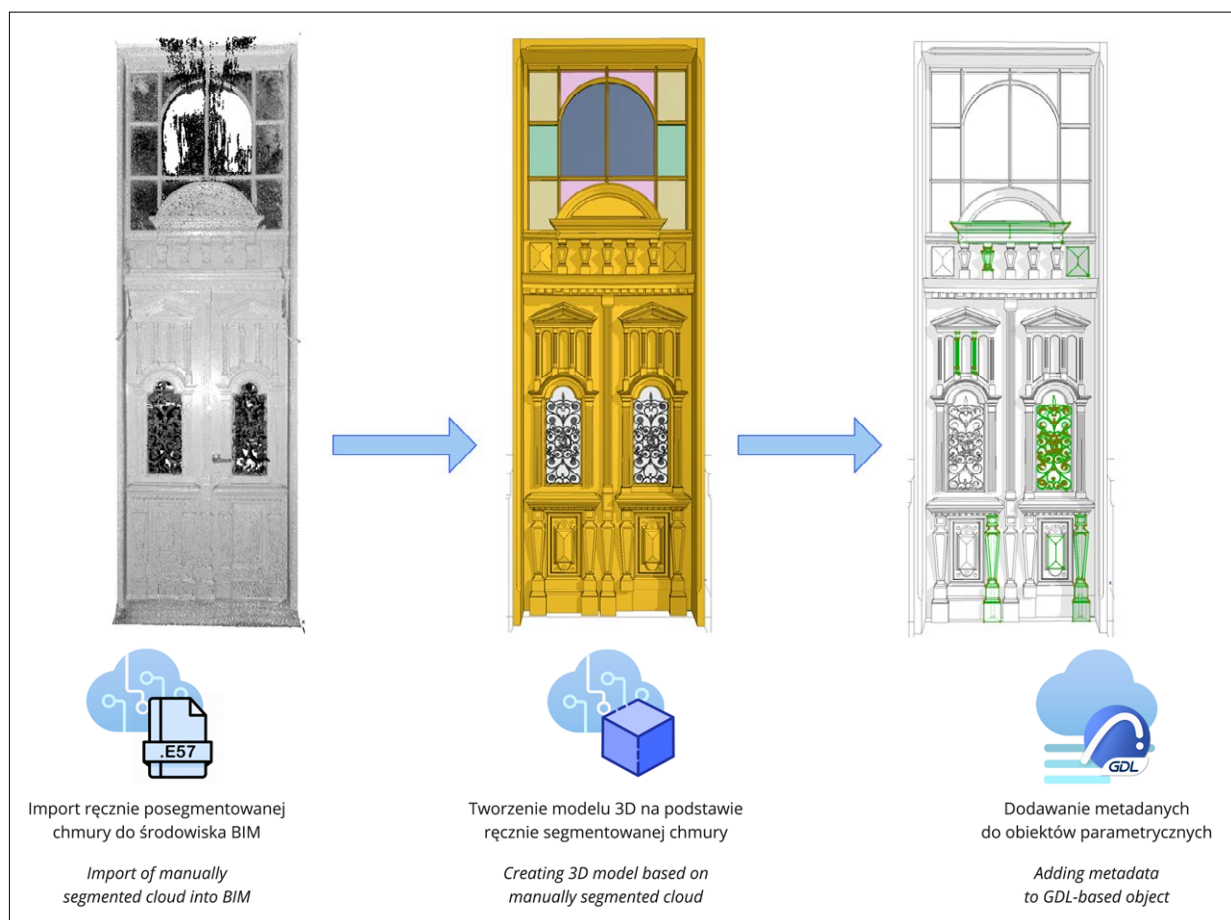
risk of registration errors. In this case study (Fig. 2, 3), a FARO Focus 3D 120s and S70 scanner was employed to accurately document the entrance portal and adjacent features, thereby enabling precise segmentation in the later stages of the modeling process.

The next step, involving the alignment and merging of raw scan data, aimed to ensure consistency and geometric accuracy in the representation of the overall structure. This process entailed the careful registration of individual scans relative to their actual survey positions. In practical terms, it required the integration of component point clouds acquired from various angles to minimize offset and distortion. In the present case, particular emphasis was placed on the correct spatial alignment of the facade segments in relation to the entrance, as this was critical to producing a reliable digital model that faithfully reflects the architectural relationships between individual components.

Following the integration of the component scans of the facade and atrium, an automated segmentation trial was conducted using the commercial Leica Cyclone 3DR software (Fig. 4). The objective of this test was to evaluate the performance of automated segmentation algorithms within the complex architectural framework of a historic building. However, the results proved unsatisfactory. The software failed to accurately identify and differentiate detailed architectural elements exhibiting diverse ornamental features, such as door frames and intricately profiled door leaves. The high degree of surface complexity, coupled with irregularities and varying states of preservation, posed significant challenges for the algorithmic classification process. This outcome highlights the limitations of standard automatic segmentation algorithms when applied to historic architecture, where geometries often deviate from contemporary norms and are affected by deformation or material degradation. The inaccuracies observed—particularly the misclassification of richly ornamented elements—demonstrate the inadequacy of default approaches in capturing the nuanced spatial characteristics of historic buildings. It is plausible that machine learning algorithms could yield improved results if given sufficient training time on the specific dataset.

In the examined case of an Art Nouveau entrance door, the automatic segmentation approach resulted in overly generalized outputs, where sculpturally embellished surfaces were interpreted as flat planes. This finding underscores the need for post-processing and manual refinement in projects involving high-detail heritage components. Specifically, for elements such as ornamental doors, accurate documentation demands segmentation methods adapted to the fine-grained particularities of the building.

Given the unsatisfactory outcomes of automated segmentation and the inherent complexity of the site, manual segmentation was employed using PointCab Origins 3D [PointCab Software 2025]. Manual segmentation offers greater precision in modeling intricate architectural forms. In this approach, the operator selectively identifies and classifies elements based on



Ryc. 5. Uproszczona wizualizacja procesu tworzenia modelu stolarki drzwiowej kamienicy z uwzględnieniem danych graficznych oraz informacji historycznych

Fig. 5. Simplified visualization of the process of creating a model of a townhouse door, taking into account graphic data and historical information

nicznej. W wypadku omawianych drzwi wejściowych ręczne wydzielenie elementów, takich jak ościeżnice, detale dekoracyjne lub zróżnicowane profile powierzchni, pozwoliło na dokładne odwzorowanie segmentów odzwierciedlających pełny kontekst estetyczny i funkcjonalny.

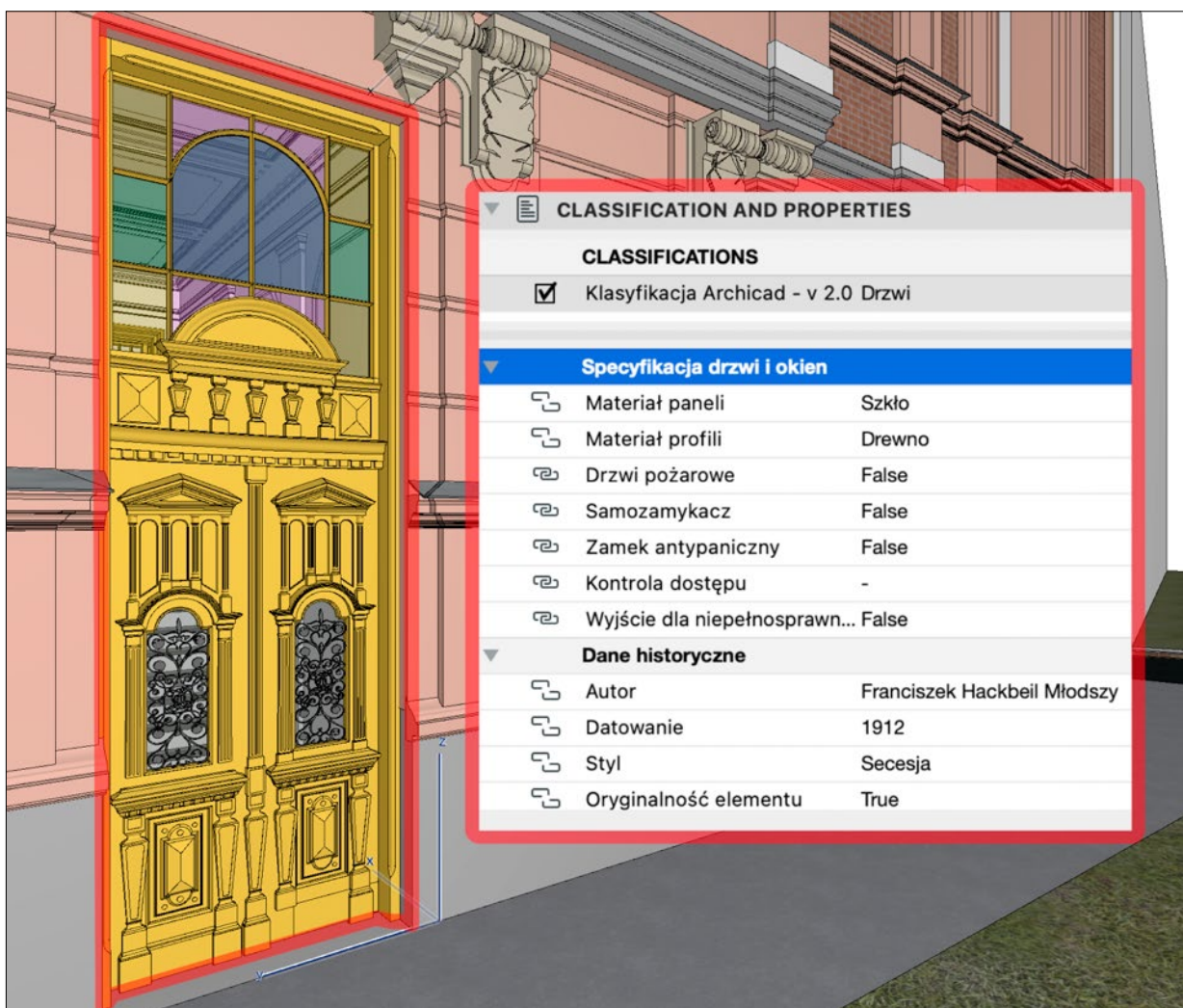
Po zakończeniu ręcznego procesu segmentacji chmury punktów zostały skonwertowane do formatów umożliwiającą płynną integrację z narzędziami do modelowania BIM, takimi jak Graphisoft Archicad. Wykorzystany został tutaj format .E57, który zapewnia kompatybilność i umożliwia przechowywanie złożonych informacji bez pogorszenia jakości danych. W rezultacie podzielone na segmenty elementy drzwi i przylegające do nich sekcje elewacji mogą być zaimportowane do środowiska BIM, gdzie służą jako podstawa do dalszej szczegółowej rekonstrukcji i tworzenia modeli parametrycznych.

Po przekształceniu i załadowaniu otrzymanych chmur punktów rozpoczyna się właściwy proces trójwymiarowego modelowania. Celem tego procesu jest stworzenie szczegółowej reprezentacji obiektu przy jednoczesnym zapewnieniu maksymalnej dokładności odwzorowania segmentowanych elementów i zachowania

domain knowledge and visual assessment, with particular focus on features of architectural relevance. For the door structure under consideration, manual separation of components such as the frame, decorative motifs, and varied surface profiles was necessary to ensure accurate spatial and stylistic representation.

Upon completion of the manual segmentation phase, the processed point cloud data were converted into a format compatible with BIM tools—in this case, the .E57 format. This format facilitates seamless integration into BIM environments, such as Graphisoft Archicad, while preserving the fidelity and complexity of the segmented data. As a result, the manually extracted door components and adjacent façade segments could be directly imported into the BIM platform for further reconstruction and parametric modelling.

The final stage involved the 3D modeling process, wherein the segmented data served as the foundation for constructing a detailed digital representation of the building. This process emphasized both the fidelity of individual components and the overall economy of data processing. By manually segmenting and describing elements such as the door frame and associated façade features and grouping them in coherent sections,



Ryc. 6. Wizualizacja podstawowych metadanych obiektu stolarki drzwiowej kamienicy

Fig. 6. Visualization of the basic metadata of the object of the door of the tenement house

waniu ekonomiki przetwarzania danych. Ręczne oddzielanie i opisywanie segmentów, takich jak ościeżnice drzwi i elementy elewacji, umożliwia zorganizowanie spójnych sekcji, które stanowią podstawę do budowy kompleksowego modelu 3D.

Ostatnim krokiem w procesie budowy modelu jest wzbogacenie go o metadane, dzięki czemu uzyskuje on pełniejszy kontekst historyczny i konserwatorski (ryc. 5–6). Uwzględnienie tych danych nie tylko pozwala na dokładniejsze zdefiniowanie charakterystyki obiektu, ale również stanowi podstawę do zbudowania zintegrowanej bazy danych 3D zgodnej ze standardem openBIM. Jest to otwarty i neutralny model współpracy, który umożliwia wymianę danych między różnymi narzędziami i uczestnikami w cyklu życia budynku, bazując na otwartych standardach takich jak IFC (*Industry Foundation Classes*). Celem openBIM jest zapewnienie interoperacyjności i usprawnienie przepływu informacji w branży AECO [Solutions and Standards 2025]

Proces tworzenia modelu HBIM dla secesyjnej kamienicy pokazuje znaczenie integracji różnych technik

a structured model was created—capable of supporting future parametric modeling.

The final stage in the modeling process involves the enrichment of the digital model with metadata, thereby situating it within a comprehensive historical and conservation context (Fig. 5, 6). The integration of such metadata allows for a more precise characterization of the building and provides the foundation for the development of an integrated 3D database compliant with the openBIM standard. OpenBIM represents an open and vendor-neutral collaborative framework that supports seamless data exchange among various tools and stakeholders throughout the building lifecycle. It is based on internationally recognized open standards, such as Industry Foundation Classes (IFC). The overarching goal of openBIM is to ensure interoperability and to optimize information flows within the AECO sector [Solutions and Standards 2025].

The process of creating an HBIM model for the Art Nouveau townhouse underscores the importance of integrating diverse segmentation techniques with semantic enrichment. This approach enables a faithful representation of the building's intricate historical, architectural, and

segmentacji i kodowania semantycznego uwzględniającego złożony kontekst historyczny i estetyczny budynku, a co za tym idzie, modelu biorącego pod uwagę wartość zabytku.

Wnioski

Tworzenie cyfrowych modeli zabytków wpisuje się w szeroko rozumianą ideę ochrony dziedzictwa architektonicznego. Należy jednak stwierdzić, co wykazano w niniejszym artykule, że budowanie takich modeli bez warstwy semantycznej pomija istotne cechy zabytku, w tym te, dzięki którym obiekt może być uznany za dobro kultury. Aby dokonać zapisu z uwzględnieniem tych uwarunkowań, potrzebna jest odpowiednia metodyka i system zapewniający możliwość kodowania znaczenia w odniesieniu do obiektu, ale także jego semantycznie ważnych elementów. Takie podejście jest możliwe przy wykorzystaniu metodyki Heritage BIM. Mimo dynamicznego rozwoju automatycznych metod segmentacji zawsze konieczne jest co najmniej sprawdzenie i korekta wyników, a w niektórych sytuacjach segmentacja ręczna, która mimo swojej pracochłonności pozwala najlepiej odzwierciedlić charakter modelowanego obiektu.

W omawianym procesie konieczna jest interdyscyplinarna współpraca z instytucjami badawczymi, konserwatorami, archeologami, historykami sztuki i innymi specjalistami, co pozwala uwzględnić niuanse często pomijane przez zautomatyzowane systemy. Cyfrowe środowiska współpracy, w których tworzone są modele z wykorzystaniem metodyki HBIM, stwarzają warunki sprzyjające realizacji tej nieodzownej współpracy interdyscyplinarnej.

aesthetic context. As a result, the model not only serves as a precise digital reconstruction but also encapsulates the cultural and historical significance of the monument.

Conclusion

The creation of digital models of architectural monuments constitutes a vital component of broader efforts to preserve cultural heritage. However, as demonstrated in this study, the preparation of such models without the integration of a semantic layer represents a critical shortcoming. This omission neglects the essential attributes that define a monument—particularly those that identify it as a cultural asset. To address this, a robust methodology and system enabling the encoding of meaning associated with both the object as a whole and its semantically significant components are required. Such an integrative approach is made possible through the application of HBIM. While recent advancements in automated segmentation methods have expanded the technical toolkit available to practitioners, the outcomes of these methods must still be rigorously evaluated and, where necessary, refined. In many cases, manual segmentation—despite its time-consuming nature—offers a more accurate and context-sensitive representation of the object's defining characteristics.

The modeling process under discussion also highlights the necessity of interdisciplinary collaboration involving research institutions, conservators, archaeologists, art historians, and other domain experts. This collaborative effort ensures that critical nuances—often imperceptible to automated systems—are not overlooked. Digital environments that support HBIM-based workflows have the potential to facilitate this essential interdisciplinary cooperation.

Bibliografia / References

- Opracowania / Secondary sources**
- Agathos Michail, Kalogeros Eleftherios, Gergatsoulis Manoli, Papaioannou Georgios, *Documenting Architectural Styles Using CIDOC CRM*, [w:] *From Born-Physical to Born-Virtual: Augmenting Intelligence in Digital Libraries. 24th International Conference on Asian Digital Libraries, ICADL 2022, Hanoi, Vietnam, November 30 – December 2, 2022, Proceedings*, red. Yuen-Hsien Tseng, Marie Katsurai, Hoa N. Nguyen, Cham 2022.
- Alshawabkeh Yahya, Baik Ahmad, *Integration of Photogrammetry and Laser Scanning for Enhancing Scan-to-HBIM Modeling of Al Ula Heritage Site*, „Heritage Science” 2023, nr 11, art. 147.
- Argasiński Karol, Kuroczyński Piotr, *Preservation Through Digitization – Standardization in Documentation of Built Cultural Heritage Using Capturing Reality Techniques and Heritage/Historic BIM Methodology*, „The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences” 2023, t. XLVIII-M-2.
- Bevilacqua Marco G., Russo Michele, Giordano Andrea, Spallone Roberta, *3D Reconstruction, Digital Twinning, and Virtual Reality: Architectural Heritage Applications*, [w:] *2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, Christchurch (New Zealand) 2022.
- Borkowski Andrzej Sz., Olszewska Patrycja, *Model HBIM jako cyfrowy bliźniak na przykładzie Chaty z Gawrych w Skansenie Kurpiowskim w Nowogrodzie*, „Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation” 2024, nr 77.

- Botín-Sanabria Diego M., Mihaita Adriana-Simona, Peimbert-García Rodrigo E., Ramírez-Moreno Mauricio A., Ramírez-Mendoza Ricardo A., Lozoya-Santos Jorge De J., *Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review*, „Remote Sensing” 2022, t. 14, nr 6.
- Bruno Nazarena, Roncella Ricardo, *HBIM for Conservation: A New Proposal for Information Modeling*, „Remote Sensing” 2019, t. 11, nr 15.
- Croce Valeria, Caroti Gabriella, Piemonte Andrea, Bevilacqua Marco G., *From Survey to Semantic Representation for Cultural Heritage: The 3D Modelling of Recurring Architectural Elements*, „Acta Imeko” 2021, t. 10, nr 1.
- Gabellone Francesco, *Digital Twin: A New Perspective for Cultural Heritage Management and Fruition*, „Acta Imeko” 2022, t. 11, nr 1.
- Gil Aleksander, Arayici Yusuf, Kumar Bimal, Laing Richard, *Machine and Deep Learning Implementations for Heritage Building Information Modelling: A Critical Review of Theoretical and Applied Research*, „Journal on Computing and Cultural Heritage” 2024, t. 17.
- Haznedar Bulent, Bayraktar Rabia, Ozturk Ali E., Arayici Yusuf, *Implementing PointNet for Point Cloud Segmentation in the Heritage Context*, „Heritage Science” 2023, nr 11, art. 2.
- Koszewski Krzysztof, Franczuk Jakub, Argasiński Karol, *Wirtualne modele dziedzictwa architektonicznego a działalność konserwatorska*, „Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation” 2021, nr 68.
- Kuroczyński Piotr, *Virtual Research Environment for Digital 3D Reconstructions – Standards, Thresholds and Prospects*, „Studies in Digital Heritage” 2017, t. 1, nr 2.
- Kuroczyński Piotr, Apollonio Fabrizio, Bajena Igor, Cazzaro Irene, *Scientific Reference Model – Defining Standards, Methodology and Implementation of Serious 3D Models in Archaeology, Art and Architectural History*, „The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences” 2023, t. XLVIII-M-2.
- Kuśnierz-Krupa Dominika, Kobylarczyk Justyna, Malczewska Joanna, Ivashko Yulia, Lisińska-Kuśnierz Małgorzata, *Analiza jakościowa edukacji architektonicznej w zakresie ochrony miasta zabytkowego*, „Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation” 2021, nr 65.
- Manovich Lev, *The Language of New Media*, Cambridge (Massachusetts) 2001.
- Niccolucci Franco, Felicetti Achille, Hermon Sorin, *Populating the Digital Space for Cultural Heritage with Heritage Digital Twins*, „Data” 2022, t. 12, nr 8.
- Niccolucci Franco, Markhoff Béatrice, Theodoridou Maria, Felicetti Achille, Hermon Sorin, *The Heritage Digital Twin: A Bicycle Made for Two. The Integration of Digital Methodologies into Cultural Heritage Research*, „Open Research Europe” 2023, t. 3, nr 64.
- Nofal Eslam, Reffat Rabee, Boschloos Vanessa, Hameeuw Hendrik, Moere Andrew, *The Role of Tangible Interaction to Communicate Tacit Knowledge of Built Heritage*, „Heritage” 2018, t. 1, nr 2.
- Oreni Daniela, Brumana Raffaella, Georgopoulos Andreas, Cuca Branka, *HBIM Library Objects for Conservation and Management of Built Heritage*, „International Journal of Heritage in the Digital Era” 2014, t. 3, nr 2.
- Pierdicca Roberto, Paolanti Marina, Matrone Francesca, Martini Massimo, Morbidoni Christian, Malinverni Eva S., Frontoni Emanuele, Lingua Andrea M., *Point Cloud Semantic Segmentation Using a Deep Learning Framework for Cultural Heritage*, „Remote Sensing” 2020, t. 12, nr 6.
- Riesenhuber Maximilian, Poggio Tomaso, *Hierarchical Models of Object Recognition in Cortex*, „Nature Neuroscience” 1999, nr 2.
- Ross Michael G., Oliva Aude, *Estimating Perception of Scene Layout Properties from Global Image Features*, „Journal of Vision” 2010, t. 10, nr 1.
- Štroner Martin, Křemen Tomáš, Urban Rudolf, *Progressive Dilution of Point Clouds Considering the Local Relief for Creation and Storage of Digital Twins of Cultural Heritage*, „Applied Sciences” 2022, t. 12, nr 22.
- Taylor Joel, Gibson Laura K., *Digitisation, Digital Interaction and Social Media: Embedded Barriers to Democratic Heritage*, „International Journal of Heritage Studies” 2016, t. 23, nr 5.
- Themistocleous Kyriacos, *Model Reconstruction for 3D Visualization of Cultural Heritage Sites Using Open Data from Social Media: The Case Study of Soli, Cyprus*, „Journal of Archaeological Science: Reports” 2017, t. 14.
- Utku Irem, Akagündüz Erdem, *A Survey on Deep Learning-Based Architectures for Semantic Segmentation on 2D Images*, „Applied Artificial Intelligence” 2022, t. 36, nr 1.
- Yang Xiucheng, Lu Yi-Chou, Murtiyoso Arnadi, Koehl Mathieu, Grussenmeyer Pierre, *HBIM Modeling from the Surface Mesh and Its Extended Capability of Knowledge Representation*, „ISPRS International Journal of Geo-Information” 2020, t. 8, nr 7.

Dokumentacja / Documentation

Huniak Oskar, Karta ewidencyjna zabytków architektury i budownictwa, Kamienica Tarnów, Fryderyka Chopina 11, sygn. nr 10850, Krajowy Ośrodek Badań i Dokumentacji Zabytków w Warszawie, 2017.

Źródła elektroniczne / Electronic sources

PointCab Software, <https://pointcab-software.com/en/> (dostęp: 25.01.2025).

buildingSMART Data Dictionary (bSDD), buildingSMART International, <https://www.buildingsmart.org/users/services/buildingsmart-data-dictionary/> (dostęp 25.01.2025).

Solutions and Standards, buildingSMART International, <https://www.buildingsmart.org/standards/> (dostęp 25.01.2025).

Streszczenie

Segmentacja semantyczna ma kluczowe znaczenie w zastosowaniu metodyki Heritage Building Information Modelling (HBIM), umożliwiając nie tylko precyzyjną dokumentację geometrii, ale także zachowanie wartości kulturowych i historycznych. Technologie takie jak naziemne skanowanie laserowe (TLS) czy fotogrametria stanowią podstawę do tworzenia tzw. cyfrowych bliźniaków, jednak same modele 3D, pozbawione semantycznego wzbogacenia, nie odzwierciedlają pełnego kontekstu obiektów zabytkowych.

Manualna segmentacja, przeprowadzana we współpracy z konserwatorami i historykami architektury, pozostaje nieodzownym elementem procesu HBIM. Pozwala uchwycić niuanse dotyczące materiałów, technik budowlanych czy detali artystycznych, które zautomatyzowane algorytmy często pomijają. W efekcie cyfrowe kopie, wiernie odzwierciedlające nie tylko układ przestrzenny, ale także integralność kulturową i historyczną obiektów, stają się narzędziem niezbędnym do efektywnej konserwacji i wieloaspektowego zarządzania dziedzictwem.

W artykule omówiono metodologie i wyzwania związane z segmentacją semantyczną w HBIM, podkreślając jej podwójną rolę: w tworzeniu cyfrowych bliźniaków i wspieraniu współpracy interdyscyplinarnej. Łącząc precyzję geometryczną z głębią semantyczną, HBIM wspiera wieloaspektowość tworzonych modeli i zapewnia zachowanie integralności kulturowej.

Abstract

Semantic segmentation is crucial in Heritage Building Information Modelling (HBIM), enabling not only precise geometric documentation, but also the preservation of cultural and historical values. Technologies such as terrestrial laser scanning (TLS) or photogrammetry provide the basis for so-called “digital twinning” of heritage, but 3D models alone—lacking semantic enrichment—do not reflect the full context of heritage buildings.

Manual segmentation, carried out in collaboration with conservators and architectural historians, remains an indispensable part of the HBIM process. It captures the nuances of materials, construction techniques or artistic details that automated algorithms often miss. The result is digital twins that faithfully reflect not only the spatial layout but also the cultural and historical integrity of the buildings, becoming an essential tool for effective conservation and multi-faceted heritage management.

This paper discusses the methodologies and challenges of semantic segmentation in HBIM, highlighting its dual role in creating meaningful digital twins and fostering interdisciplinary collaboration. By combining geometric precision with semantic depth, HBIM supports interdisciplinary collaboration and ensures the preservation of cultural integrity.