

dr inż. Paweł Tysiąc^{1*)}
 ORCID: 0000-0002-5017-4522
 mgr inż. Anna Sieńska¹⁾
 mgr inż. Marta Tarnowska¹⁾
 mgr inż. Piotr Kędziorski²⁾
 ORCID: 0000-0001-7753-2388
 dr inż. Marcin Jagoda²⁾
 ORCID: 0000-0001-8073-6242

Modelowanie 3D zabytkowego obiektu sakralnego za pomocą stacjonarnego skaningu laserowego na podstawie analizy światła naturalnego

3D modeling of a historic sacred object with the use of Terrestrial Laser Scanning Technology and natural light analysis

DOI: 10.15199/33.2022.11.45

Streszczenie. Technologia skanowania laserowego jest powszechnie stosowana w inwentaryzacji obiektów kultury. Ciągły wzrost technologiczny pozwala na wykorzystanie złożonych modeli cyfrowych 3D przez coraz większą liczbę odbiorców. Jedną z odmian zastosowania modeli jest tzw. HBIM (HistoricalBIM/HeritageBIM). W artykule skupiliśmy się na pierwszym z etapów zarządzania takim projektem, jak inwentaryzacja. Celem pracy jest określenie przydatności stosowania modelowania 3D na potrzeby analizy obiektów kultury oraz analiza dokładności modelu. Na podstawie wykonanego modelu przeprowadzono analizę oświetlenia kościoła. Przedstawiona metoda może być interpretowana pod kątem technicznym oraz humanistycznym (w przypadku analizy sacrum).

Słowa kluczowe: modelowanie 3D, skaningu laserowego, analizy światła.

Abstract. The laser scanning technology is a commonly used method in the inventory of cultural objects. Continuous technological growth allows the use of complex digital 3D models by an increasing number of recipients. One of the varieties of model applications is the so-called HBIM (HistoricalBIM/HeritageBIM). In the article, we focused on the first stage of project management, which is inventory. The aim of the research is to determine the suitability of using 3D modeling for the purposes of analyzing cultural objects and analyzing the accuracy of the model. The lighting of the church was analyzed on the basis of the model. The presented method can be interpreted from a technical and humanistic point of view (in the case of the analysis of the sacred).

Keywords: 3D modeling; Laser Scanning; light analysis.

Pracowanie trójwymiarowych modeli obiektów sakralnych, będących często budynkami wielowiekowymi, wymaga zaawansowanej technologii umożliwiającej cyfrową rejestrację geometrii i wyglądu budynku. Dane tego typu są ważne z perspektywy ciągłego narażenia obiektów na zniszczenie przez czynniki ludzkie i naturalne [1, 2]. Systematyczne zbieranie szczegółowych informacji o zabytkach pozwoli na przekazanie wiedzy o nich przyszłym pokoleniom [3]. Jedną z metod pozyskiwania szczegółowych danych jest **skaningu laserowego** [4]. Pozwala on na dostarczanie informacji bezpośrednio w formie chmury

punktów, a więc w formie danych 3D [5, 6]. Dane ze skaningu mogą być bezpośrednim źródłem informacji do modelowania 3D [7÷9]. Pozyskane w ten sposób informacje stanowią podstawę do wykorzystania w technologii BIM, która pozwala na wizualizację obiektu o rzeczywistych parametrach [10÷12]. Proces modelowania obiektów zabytkowych wymaga szczególnej uwagi, ponieważ ze względu na długi czas użytkowania są niedoskonałe geometrycznie, zdeformowane, co utrudnia modelowanie. Każdy taki obiekt wymaga spersonalizowanego podejścia i określenia minimalnego poziomu szczegółowości, jaki ma wyrażać stworzony model [13÷15].

Powszechność stosowania bezinwazyjnych metod pomiarowych do analizy stanu konstrukcji oraz modelowania 3D została szczegółowo omówiona w literaturze, np. w [16, 17] opisano, jak duże znaczenie mają badania obiektów

zabytkowych przed prowadzeniem prac konserwatorskich. W artykule skupiono się na omówieniu metody inwentaryzacji obiektów zabytkowych, trudnościach w modelowaniu 3D oraz analizie uzyskanych wyników. Podjęte prace mają na celu pokazanie możliwości, jakie daje technologia skanowania laserowego oraz w jakich trybach może okazać się przydatna. Udowodniono też, że warto prowadzić badania pod kątem analizy światła naturalnego w świątyni. Oprócz znaczenia kulturalnego [18], przeprowadzone analizy można doposażać do potrzeb inżynierskich w postaci monitorowania geometrycznego stanu konstrukcji.

Obiekt badań i użyte technologie

Obiektem badań jest kościół św. Wojciecha w Gdańsku. Pierwsze wzmianki o świątyni pochodzą z XIII w.

¹⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

²⁾ Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji

*) Adres do korespondencji: pawel.tysiac@pg.edu.pl

Kościół zbudowany jest na planie krzyża łacińskiego. Składa się z nawy głównej, dwóch bocznych kaplic skierowanych na północ i południe oraz wieży o drewnianej konstrukcji, wybudowanej w technologii bez użycia gwoździ.

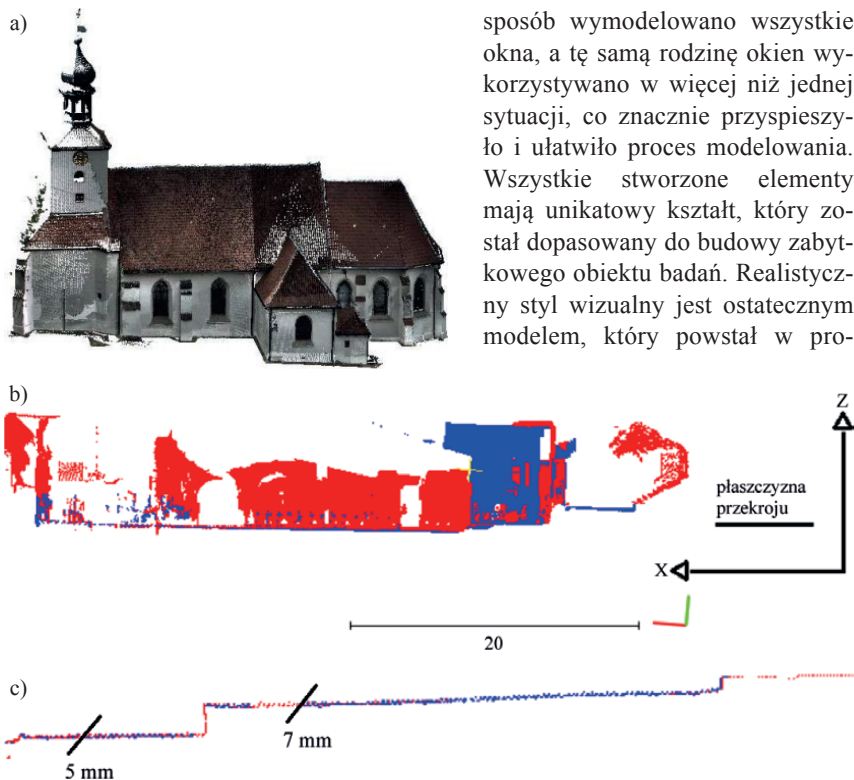
Do pozyskania danych przestrzennych wykorzystano technologię skaningu laserowego. Aby uzyskać jak najbardziej precyzyjne informacje, niezbędne do procesu modelowania 3D, pracę podzielono na dwa etapy:

1) wykonanie filtracji w celu usunięcia szumów;

2) rejestracja stanowisk pomiędzy sobą, najpierw na punkty nawiazania, a następnie z wykorzystaniem algorytmu ICP (ang. Iterative Closest Points).

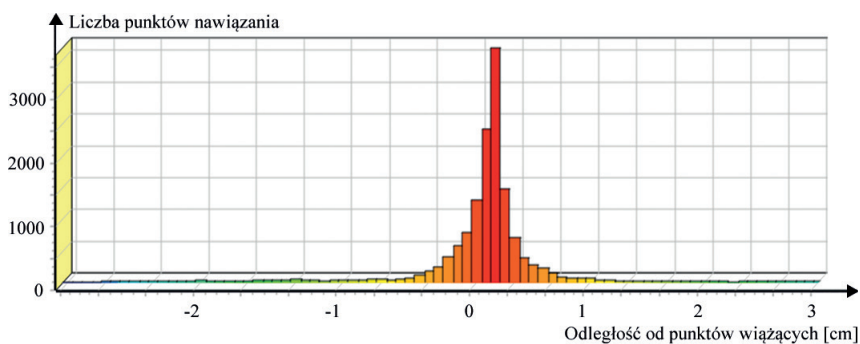
Na rysunku 1 pokazano wynikową chmurę punktów oraz przykładowe przekroje przez chmurę świadczące o precyzji wyrównanych danych przestrzennych. Rysunek 2 przedstawia błędy RMSE (ang. Root Mean Square Error) rejestracji skanów jako odległości pomiędzy punktami nawiazania. Dokładność chmury punktów szacuje się na ok. 5 mm. Mają na to wpływ: dokładność nawiazania stanowisk do lokalnego, wyznaczonego przez pierwsze stanowisko układu współrzędnych wynoszących ok. 2 mm oraz dokładność pozyskania informacji geometrycznej każdego ze skanów, który wynosił ok. 1 mm na 10 m. W ramach zadania zrealizowano i poddano obróbce 18 skanów konstrukcji, co po wyrównaniu dało ok. 400 mln punktów.

Proces modelowania wykonano w oprogramowaniu Autodesk Revit. Pierwszym krokiem było utworzenie poziomów modelowania. Na potrzeby opracowania wykonano 66 poziomów (rysunek 3a). Modelowanie rozpoczęto od ścian. Przebieg ściany wskazywano po ścieżce, a jej grubość była określana na podstawie odległości pomiędzy skanem zewnętrznym a wewnętrznym na danym obszarze. Dachy zostały wymodelowane przy użyciu podrysu (rysunek 3b). Wskazywano pętle obwodu i określano kąt pochylenia dachu. Ostatnim etapem modelowania była wieża, najbardziej skomplikowana ze względu na złożoną konstrukcję. Wszelkie elementy powtarzalne,



Rys. 1. Wynikowa chmura punktów: a) przekrój przez wynikową chmurę punktów; b) określenie maksymalnej odległości pomiędzy poszczególnymi skanami; c) precyzja łączenia skanów pokazana w przekroju

Fig. 1. Laser Scanning results a); Point Cloud section plane b); precision of scan positions alignment c)



Rys. 2. Błędy wpasowania poszczególnych skanów w postaci histogramu odległości punktów wiążących

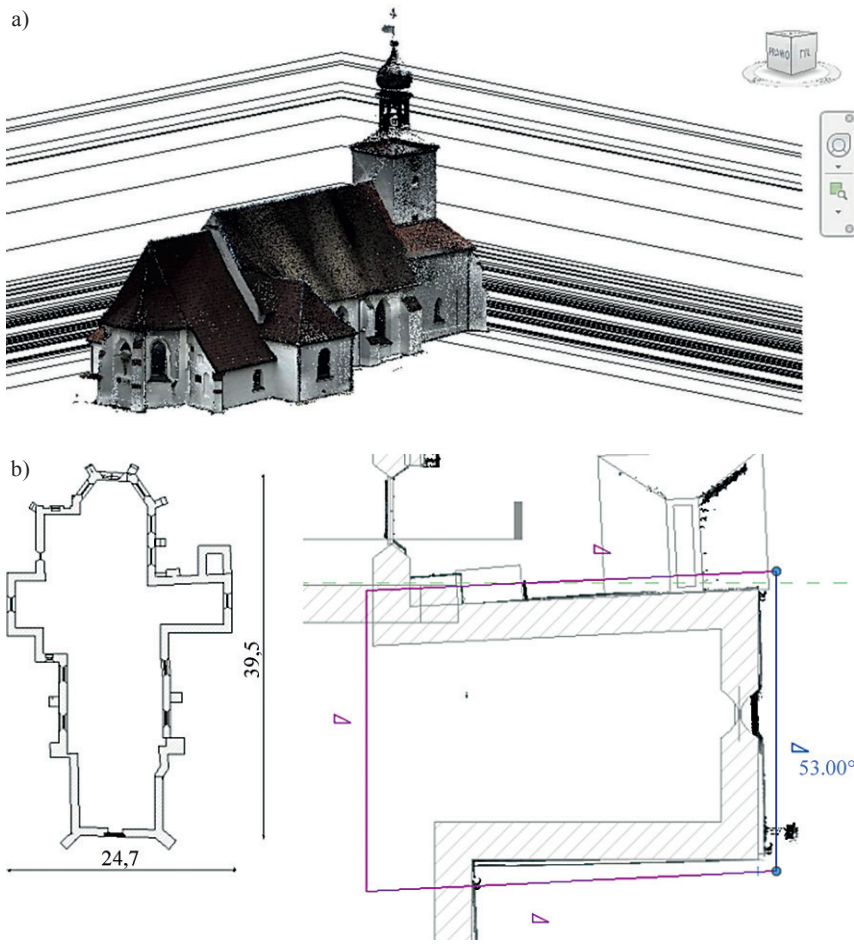
Fig. 2. Histogram of residues between scan positions alignment tie-points

jak okna czy drzwi, zostały najpierw zdefiniowane w postaci rodzin, a następnie wstawione w odpowiednie miejsca. W zabytkowych budynkach o grubych ścianach stosuje się zwykle różne typy wycięcia zarówno w poziomie, jak i w pionie. Uniemożliwia to wykorzystanie istniejących rodzin i konieczne jest utworzenie nowych, które wykorzystują inny typ cięcia ścian, łącząc niektóre operacje, takie jak: wycięcia, przeciągnięcia, wyciągnięcia, narzędzia obrotowe i inne. W taki

sposób wymodelowano wszystkie okna, a tę samą rodzinę okien wykorzystywano w więcej niż jednej sytuacji, co znacznie przyspieszyło i ułatwiło proces modelowania. Wszelkie stworzone elementy mają unikatowy kształt, który został dopasowany do budowy zabytkowego obiektu badań. Realistyczny styl wizualny jest ostatecznym modelem, który powstał w pro-

gramie Autodesk Revit (rysunek 3c). Wszelkie kolory fragmentów świątyni oraz zastosowane materiały, użyte do prezentacji modelu, starano się odwzorować w jak najbardziej rzeczywisty sposób.

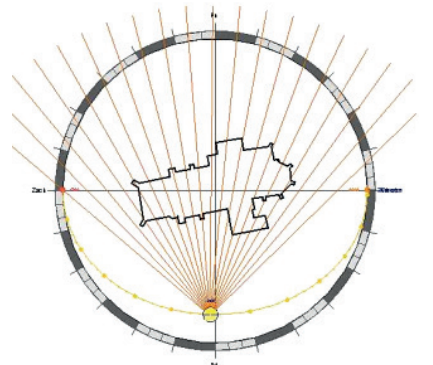
Analizę nasłonecznienia świątyni przeprowadzono w programie Autodesk Revit. Przed rozpoczęciem prac należało zdefiniować położenie geograficzne badanego obiektu, datę, czas oraz poziom odniesienia, w przypadku którego będą wykonywane analizy.



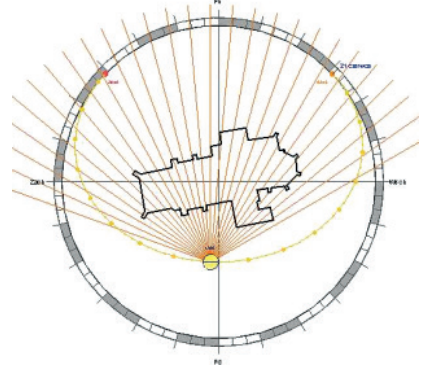
Omówienie wyników

Dane chmury punktów, pomimo bardzo dobrej jakości i szczegółowości, mają miejsca, w których ograniczone są możliwości dokładnego modelowania. Największy problem stwarzają elementy o nieregularnym kształcie lub skomplikowanej strukturze. W niektórych miejscach chmura punktów jest zbyt rzadka, dlatego też etap modelowania należy przeprowadzić w sposób

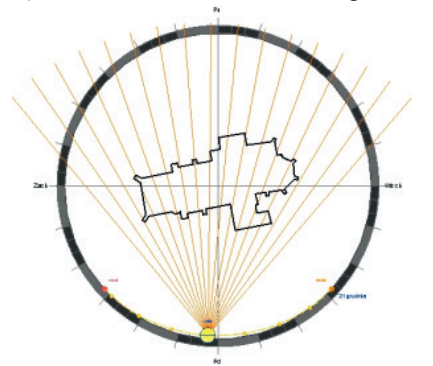
a) 20 marca; 23 września



b) 21 czerwca



c) 21 grudnia



Rys. 4. Projekcja światła słonecznego w charakterystycznych dniach roku: a) 20 marca; 23 września; b) 21 czerwca; c) 21 grudnia

Fig. 4. Sunlight projection: a) March 20th and September 23rd; b) June 21st; c) December 21st

Rys. 3. Etapy modelowania 3D: a) utworzenie powierzchni modelowania; b) analiza podrysów w przypadku wskazanych poziomów; c) wynikowy model 3D

Fig. 3. 3D modeling steps: a) modeling levels indication; b) indicated levels for underlining analysis; c) 3D model result

Badania przeprowadzono w dniu równonocy jesiennej (23 września), równonocy wiosennej (20 marca), pierwszego dnia zimy (21 grudnia) oraz lata (21 czerwca). Analizując trajektorię Słońca w poszczególnych porach roku, można zauważyć różną długość cienia rzucanego przez badany obiekt. Najdłuższy cień występuje 21 grudnia. Kąt padania promieni słonecznych zmienia się wraz ze zmianą pór roku. Bardzo ważnym aspektem przeprowadzonych analiz jest omówienie teoretycznego wzrostu wilgotności w miejscach całorocznego zacienienia. Może

to powodować pojawienie się porostów na budynku bądź szybsze zmczenie materiału. Aspekt projektowania położenia budynków w zależności od kąta padania promieni słonecznych jest znany w budownictwie, ale wiekowe budynki mogły charakteryzować się błędami w ich usytuowaniu bądź też zagospodarowanie terenu wokół kościoła mogło spowodować zmianę warunków oświetlenia. Jako reprezentatywny przykład analizy oświetlenia pokazano rzut promieni słonecznych w charakterystycznych dniach roku (rysunek 4).

intuicyjny. Czynnikiem, które mają na to wpływ, jest istniejąca sytuacja terenowa oraz metoda skanowania laserowego. Urządzenie pomiarowe mniej szczegółowo odwzorowuje miejsca, które znajdują się na dużej wysokości, w tym przypadku: górne partie elewacji, wieżę oraz dach. Występują tam martwe pola, spowodowane przesłanianiem się skanowanych fragmentów bądź też złymi warunkami pomiaru. Takie nierównomierności pokrycia chmurą punktów mają niekorzystny wpływ na proces modelowania 3D. Rozwiązaniem jest wykorzystanie dodatkowych metod pomiarowych, np. z zastosowaniem bezzałogowych statków powietrznych.

W artykule dokonano analizy intensywności odbicia wiązki skanera oraz sprawdzono zakres dynamiki kolorów RGB (Red-Green-Blue) względem konkretnego materiału, z którego zbudowane są poszczególne elementy kościoła. Sprawdzono odpowiednio: okna; tynk; drewno oraz nową i starą dachówkę. Zakres intensywności odbicia wiązki skanera wynosił 10% (w przypadku wartości 0–1) oraz 30% przy kolorach RGB (dla wartości 0–255). Jednym z elementów konserwacji kościoła był dach. Dachówka po renowacji jest koloru czerwonego i różni się od pierwotnej (kolor szary), która znajduje się na przyporach (fotografia a). Wykazano, że łącznie 4 przypory nie zostały objęte konserwacją. Starsza dachówka wykazuje cechy degradacji i wykruszania się materiału, co jest możliwe do zaobser-

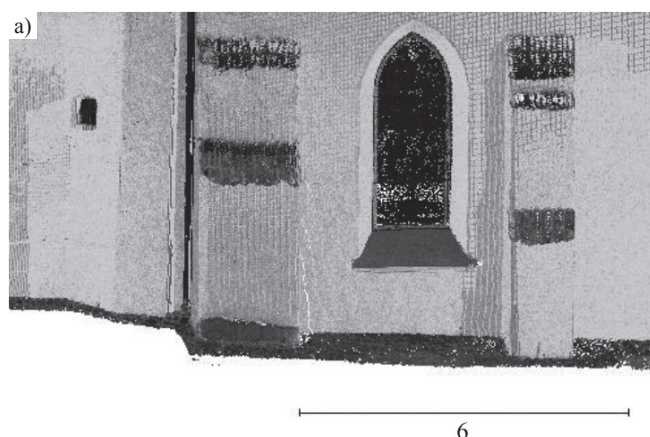
wowania w chmurze punktów w postaci nierównych zakończeń. Patrząc na obiekt od strony północno-zachodniej (miejsce zacienione), można dostrzec zjawisko porostania dachówki mchem (fotografia b). Teren w tym miejscu jest zacieniony, wilgotny, narażony na opadanie pyłków i liści z drzew. Intensywność odbicia wiązki skanowania, tam gdzie znajduje się mech, jest nieco mniejsza niż w pozostałych częściach dachu. Jeśli doprowadzi się do nagromadzenia zbyt dużych jego ilości, pogarsza parametry fizykochemiczne dachówki – może zmniejszyć się wytrzymałość materiału i spowodować ewentualne wykruszanie się dachu w taki sposób, jak ma to miejsce na przyporach.

Analizy nasłonecznienia wykazały, że przed godziną 8:00 w porze jesiennej, wiosennej oraz letniej, promienie słoneczne docierają do okien znajdujących się na prezbiterium. Latem, gdy Słońce jest wyżej, dociera także do okien znajdujących się w południowej części kościoła. W godzinach 8:00–10:00, od jesieni do wiosny, pada na dach bliżej prezbiterium, natomiast latem o tej samej porze oświetlone są także okna w środkowej części świątyni. Przez cały rok w godzinach 10:00–14:00 promienie słoneczne docierają do wszystkich okien znajdujących się po stronie południowej, w godzinach od 14:00 do 16:00 oświetlone są okna obok wejścia do świątyni, natomiast wiosną oraz jesienią światło naturalne dociera również do okna znajdującego

się na prezbiterium. Od wiosny do zimy po godzinie 16:00 do zachodu słońca promienie słoneczne wpadają do wnętrza kościoła przez drzwi wejściowe znajdujące się po stronie zachodniej badanego obiektu. W związku z tym najlepiej doświetlonymi elementami kościoła jest prezbiterium, nawa główna oraz kaplica południowa, a najmniej oświetlona jest kaplica północna.

Wnioski

Modelowanie 3D jest efektywnym rozwiązaniem umożliwiającym prezentację danego obiektu. Wizualizacja 3D pozwala śledzić zmiany, jakie zachodzą w obiekcie z biegiem lat oraz określać ewentualne potrzeby budynku na prace konserwatorskie. Dokładność modelu uzależniona jest od jakości chmur punktów. Oprócz dokładności skanera, na dokładność wpływają błędy podczas nawiązania poszczególnych stanowisk skanera w przestrzeni. Średni błąd nawiązania nie przekroczył 5 mm. Należy wziąć pod uwagę także dokładność modelowania. Jest ona uzależniona od doświadczenia osoby tworzącej model oraz od możliwości, jakie daje środowisko, w którym pracuje. Zbudowany model zawierający najmniejszy detal udowadnia, że prawie wszystkie elementy geometrii obiektu da się wymodelować (z uwzględnieniem pomiarów uzupełniających). Wykonana chmura punktów oraz uzupełnienie fotograficzne „martwych pól” okazały się podstawą do utworzenia dokładnego modelu 3D.



Elementy degradacji w miejscach zacienionych i nieodrestaurowanych: a) widok chmury punktów na zdegradowanej dachówce; b) dach porośnięty mchem
Elements of degradation in shaded and unrestored places: a) view of a point cloud on a degraded tile; b) moss roof growth

Podczas procesu modelowania należy podejmować świadome decyzje, dotyczące zastosowanych rozwiązań, gdyż historyczne obiekty kultury cechują się często niedoskonałością i niejednorodnością geometrii.

Na podstawie analiz oświetlenia okazało się, że światło wpadające do kościoła jest najsilniej skupione na ławkach znajdujących się po jego prawej stronie. Lewa strona oświetlona jest światłem mniej intensywnym. Bezpośrednie promienie padające na wierzchołki po prawej stronie mogą powodować ich dyskomfort. Przez większość dni w roku promienie słoneczne skupiają się na ołtarzu. Analizując oświetlenie kościoła, stwierdzono, że najbardziej zacieniona jest jego północna strona. Powoduje to dużą wilgotność, co może mieć negatywny wpływ na materiały konstrukcyjne. Orientacja kościoła wpływa na sposób i miejsce wpadania promieni słonecznych do jego wnętrza. Światło powinno być tak zaprojektowane, aby nie rozpraszało wiernych, ale pomagało im się skoncentrować.

Sytuacja terenowa wokół kościoła stanowiła pewną przeszkodę w dokładnym pozyskaniu danych. Mocno zurbanizowany teren uniemożliwiał odpowiednie zaprojektowanie stanowisk, w efekcie czego powstały „martwe pola”. Przykładem takiego elementu kościoła jest wieża. Ze względu na jej wysokość i konstrukcję skaner nie był w stanie dotrzeć do niektórych elementów. Rozwiązaniem, które może pomóc w uzyskaniu dokładniejszego modelu, jest ustawienie stanowiska skanera w odpowiedniej odległości od obiektu. Kąt padania wiązki lasera na obszar, który chcemy zeskanować, powinien być wtedy możliwie jak najmniejszy. Wielkość plamki lasera padająca na obiekt jest ściśle związana z odległością obiektu od skanera, a tym samym decyduje o rzeczywistej dokładności.

O ile w przypadku projektowania nowych obiektów oprogramowanie do modelowania 3D daje bardzo duże możliwości, to modelowanie obiektów zabytkowych zmusza operatora do generalizacji pewnych elementów budynku. W przypadku zastosowania dokładnego modelu np. opracowanie

ścian okazało się bardzo czasochłonne i problematyczne ze względu na niedoskonałości ich geometrii.

Modelowanie 3D bardzo dobrze sprawdza się w badaniu nasłonecznienia danego obiektu. Przeprowadzone analizy dokładnie odzwierciedlają rzeczywiste światło słoneczne w kościele. Mogą być przydatne do wszelkiego rodzaju prac remontowych, rozbudowy kościoła, a także do zaaranżowania przestrzeni w jego otoczeniu. Opracowany przez nas model nasłonecznienia pokazał, jak duży wpływ na uczucia wiernych ma odpowiednia ekspozycja na światło w zależności od tego, gdzie zajmą miejsce w czasie uroczystości. Dodatkowo, oprócz prac inżynierskich, model nasłonecznienia może być wykorzystany do prawidłowego zaplanowania cyklu życia świątyni.

Literatura

- [1] Stojaković V, Tepavcevic B. Optimal Methods for 3D Modeling of devastated architectural objects. ISPRS Archives. 2009;XXXVIII-5/W1.
- [2] Münster S, Koehler T. 3D Reconstruction of Cultural Heritage Artifacts A Literature Based Survey of Recent Projects and Workflows. In Virtual Palaces, Part II. Lost Palaces and their Afterlife. Virtual Reconstruction between Science and Media. Paladium, 2016, pp. 87–102, ISBN 978-94-6018-538-0.
- [3] Remondino F. Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. Remote Sensing. 2011;3;6:1104-1138; <https://doi.org/10.3390/rs3061104>.
- [4] Gajewski J, Fajtek D. Zastosowanie wybranych technologii BIM w inwentaryzacji oraz projektowaniu konstrukcji budowlanych. Materiały Budowlane. 2020;3:48-50.
- [5] Kędzierski M, Walczykowski P, Fryskowska A. Wybrane aspekty opracowania dokumentacji architektonicznej obiektów zabytkowych. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji. 2008;18a:221-230.
- [6] Pawłowicz J. Modelowanie budynków z danych skaningowych 3D na potrzeby Building Information Modeling. Materiały Budowlane. 2018;1:112-114; <https://doi.org/10.15199/33.2018.10.34>.
- [7] Bartonek D, Buday M. Problems of Creation and Usage of 3D Model of Structures and Theirs Possible Solution. Symmetry. 2020;12(1); <https://doi.org/10.3390/sym12010181>.
- [8] Pawłowicz JA. Importance of Laser Scanning Resolution in the Process of Recreating the Architectural Details of Historical Buildings. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017;245; <https://doi.org/10.1088/1757-899x/245/5/052038>.

[9] Kwoczyńska B, Piech I, Polewany P, Góra K. Modeling of Sacral Objects Made on the Basis of Aerial and Terrestrial Laser Scanning. Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics). 2018:275-282; <https://doi.org/10.1109/BGC-Geomatics.2018.00059>.

[10] Yang T, Liao L. Research on Building Information Model (BIM) Technology. World Construction. 2016;5:1; <https://doi.org/10.18686/wcj.v5i1.1>.

[11] Stylianidis E, Remondino F. Basics of photography for cultural heritage imaging; Basics of image-based modelling techniques in cultural heritage 3D recording. In Documentation and Management of Cultural Heritage. Whittles Publishing, Dunbeath, Scotland, 2016, ISBN 978-184995-168-5.

[12] Bernardini F, Rushmeier H, Martin I, Mittleman J, Taubin G. Building a Digital Model of Michelangelo's Florentine Piet. IEEE Computer Graphics and Applications. 2001;22:59-67; <https://doi.org/10.1109/38.974519>.

[13] Adami A, Scala B, Spezzoni A. Modelling and accuracy in a BIM environment for planned conservation: the apartment of Troia of Giulio Romano. ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2017; XLII-2/W3:17-23, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-17-2017>.

[14] Guidi G, Beraldin J, Atzeni C. High-Accuracy 3-D Modeling of Cultural Heritage: The Digitizing of Donatello's "Maddalena". IEEE transactions on image processing : a publication of the IEEE Signal Processing Society. 2004;13:370-80; <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.822592>.

[15] Sampaio AZ, Pinto AM, Gomes AM, Sanchez-Lite A. Generation of an HBIM Library regarding a Palace of the 19th Century in Lisbon. Applied Sciences. 2021;11;5 <https://doi.org/10.3390/app11157020>.

[16] Remondino F, Guarneri A, Vettore A. 3D modeling of Close-Range Objects: Photogrammetry or Laser Scanning. Proc SPIE. 2004;5665:216-225; <https://doi.org/10.1117/12.586294>.

[17] Adami A, Fregonese L, Lattanzi D, Mazzeri A., Rossignoli O, Scala B. A Multidisciplinary Conservation Project for the Cavallerizza Courtyard, Palazzo Ducale di Mantova. Heritage. 2019;2;2:1441-1459; <https://doi.org/10.3390/heritage2020091>.

[18] Trisno R, Lianto F. The Meaning of Natural Lighting on Altar Case Study: Cathedral Church and Church of the Light. International Journal of Civil Engineering and Technology. 2012;209-213.A.

Pomoc w badaniach uzyskano w ramach dofinansowania projektu Argentum Triggering Grants w Inicjatywie Doskonałości Uczelni Badawczej Politechniki Gdańskiej zgodnie z decyzją DEC-26/2021/IDUB/I.3.3

Przyjęto do druku: 26.09.2022 r.