Eryk Bunsch, Robert Sitnik

PROCES DIGITALIZACJI 3D OD ZAŁOŻEŃ DO DOKUMENTACJI CYFROWEJ

Techniki digitalizacji dzieł sztuki stają się coraz bardziej uznawanym i stosowanym narzędziem w procesie dokumentacji stanu zachowania obiektów zabytkowych. Pozyskane dane cyfrowe mogą być przetwarzane na wiele postaci użytecznych podczas badań naukowych, prac konserwatorskich lub działań o charakterze edukacyjnym. Raz zebrane dane pomiarowe mogą być przetwarzane na wiele różnych form przy spełnieniu warunku określającego, że ich jakość jest wystarczająca dla każdej z nich. Jakość danych cyfrowych definiowana jest przez ich końcowe parametry techniczne oraz poprawność procesu ich rejestracji. Najbardziej powszechną formą digitalizacji dzieł sztuki jest dokumentacja dwuwymiarowa (2D) realizowana zazwyczaj z zastosowaniem skanerów płaskich lub aparatów cyfrowych.

W ciągu ostatnich kilku lat coraz częściej zaczęły pojawiać się trójwymiarowe obiekty cyfrowe (3D) rejestrowane za pomocą skanerów 3D. Dane pozyskane dzięki tym urządzeniom mają postać chmur punktów (x, y, z) lub siatek trójkątów odwzorowujących kształt powierzchni obiektów oryginalnych. W wielu przypadkach dane o kształcie powierzchni wzbogacane są informacjami o barwie obiektu w postaci barwy punktów lub tekstury w przypadku siatki trójkątów. Ze względu na to, że technologia skanowania 3D jest stosunkowo nowa, to jakość dostępnych danych cyfrowych 3D jest bardzo różna. Począwszy od szczegółowych i pieczołowicie realizowanych dokumentacji 3D po bardzo ogólne wizerunki prezentowane z zastosowaniem technik rzeczywistości wirtualnej.

Poprawne przeprowadzenie procesu digitalizacji 3D wymaga dokładnego określenia celów tego procesu i szczegółowego przygotowania poszczególnych etapów pracy. Proces ten rozpoczyna się od wyboru obiektów, określenia celów digitalizacji 3D oraz oczekiwanych parametrów technicznych danych cyfrowych. Następnie dobierana jest właściwa technika pomiaru 3D oraz planowany jest cały proces akwizycji danych. Powinien on uwzględniać: niezbędne przygotowawcze działania konserwatorskie, ruch obiektów, warunki procesu skanowania, kalibrację stosowanych urządzeń, weryfikację jakości pozyskiwanych danych oraz sposób dokumentacji przebiegu całego procesu. Następnie należy określić sposoby archiwizacji i zabezpieczania pozyskanych danych cyfrowych. Przedstawione w artykule wytyczne powstały w trakcie prac nad projektami naukowymi i dokumentacyjnymi realizowanymi przy współpracy Politechniki Warszawskiej, Muzeum Pałacu w Wilanowie oraz Akademii Sztuk Pięknych w Warszawie.

Cele digitalizacji 3D

Przed rozpoczęciem omawiania procesu digitalizacji 3D należy zdefiniować podstawowe cele, jakie dzięki niemu można zrealizować, a mianowicie:

- utworzenie cyfrowej kopii wieczystej[1]– wierna, cyfrowa reprezentacja kształtu powierzchni obiektu odwzorowana z takim poziomem szczegółowości, że zastosowanie nawet dokładniejszej metody pomiaru w przyszłości nie pozwoli na uzyskanie nowych merytorycznie informacji o obiekcie, cyfrowa kopia wieczysta może być wykorzystana do utworzenia każdej innej cyfrowej reprezentacji obiektu;
- dokumentacja stanu zachowania obiektu do celów konserwatorskich[2] – cyfrowa reprezentacja kształtu powierzchni pozwalająca na precyzyjne i obiektywne dokumentowanie aktualnego stanu

zachowania powierzchni obiektu pod kątem konkretnych i zdefiniowanych celów procesu konserwacji, ten typ dokumentacji spełnia doraźne wymagania działu konserwacji podczas bieżących prac, ale zazwyczaj nie jest tak wymagający, jak kopia wieczysta;

- utworzenie cyfrowej reprezentacji obiektu do prezentacji w czasie rzeczywistym[3] – reprezentacja cyfrowa wizerunku obiektu utworzona zazwyczaj w postaci siatki trójkątów[4] z przeznaczeniem do prezentacji w Internecie. Ze względu na ograniczenia wielkości i szczegółowości obiektu reprezentacja ta oddaje tylko przybliżony wygląd obiektu.

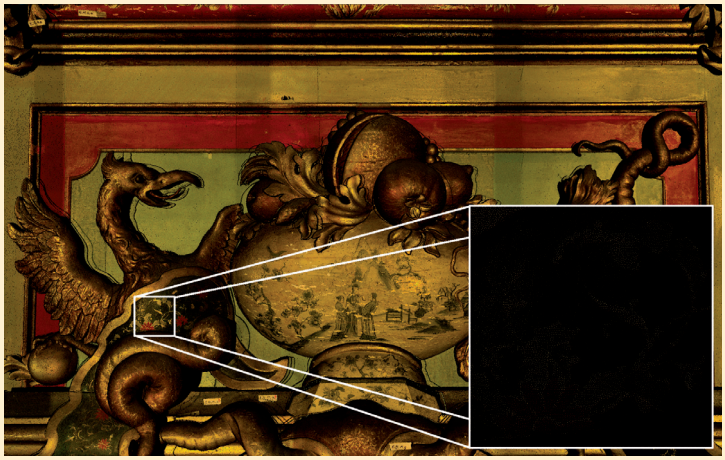
Aktualnie stosowane techniki pomiarowe nie pozwalają na dokumentowanie całej powierzchni skomplikowanych obiektów ze względu na ograniczenia metod pomiarowych (przysłonięcia, otwory, itp.). Warto zwrócić uwagę, że przy tworzeniu reprezentacji do wizualizacji w Internecie zazwyczaj uzupełniane są fragmenty, które nie mogły zostać pomierzone. Autorzy, zgodnie z postulatami Karty Londyńskiej[5], sugerują, aby w takich przypadkach jednoznacznie zdefiniować, co zostało zmierzone (dokumentacja), a co uzupełnione na etapie modelowania (kreacja).

Określenie wymaganych parametrów technicznych i metody pomiarowej

Po wyborze obiektów i określeniu celu lub celów digitalizacji 3D należy wyspecyfikować, jakie są wymagania techniczne związane z końcowymi danymi cyfrowymi. Po uwzględnieniu parametrów powierzchni obiektów, ich kształtu oraz wymagań technicznych dla końcowych danych należy wybrać optymalną technikę pomiaru. Dodatkowo po wyborze techniki pomiaru należy zapewnić właściwe warunki, w których ten proces będzie realizowany.

Do głównych parametrów technicznych, jakimi powinny się charakteryzować dane pomiarowe, należą:

- rozdzielczość przestrzenna danych – definiowana jako minimalna odległość między punktami pomiarowymi (x, y, z) odwzorowującymi kształt powierzchni badanego obiektu (il. 1); wartość ta może być wyrażana jako liczba punktów pomiarowych na mm^2,
- dokładność pomiaru – definiowana jako miara błędu, z którą wyznaczany jest każdy punkt (x, y, z), jest ona wyrażana w milimetrach,
- odwzorowanie barwy – określające, przy jakich warunkach oświetleniowych pobrana została barwa obiektu w każdym punkcie (x, y, z),



1. Wizualizacja przykładowego wyniku digitalizacji 3D w postaci chmury punktów ze zbliżeniem na fragment pomiaru

1. Visualisation of an example of the outcome of 3D digitisation in the form of a cloud point with a close-up of a fragment of the measurement

- format danych końcowych – zazwyczaj stosuje się zapis w postaci chmur punktów (x, y, z) lub siatek trójkątów.

Ze względu na różnorodność kształtów, materiałów i parametrów powierzchni (zróżnicowana chropowatość, różny stopień połyskliwości, itp.), jaką charakteryzują się obiekty zabytkowe dla każdej grupy obiektów należy dobrać parametry indywidualnie. Aktualnie na świecie nie istnieją standardy lub wytyczne definiujące wartości tych parametrów. Z tego względu autorzy podjęli próbę ich definicji dla wybranego zakresu materiałów i technik w ramach projektu badawczo-rozwojowego zatytułowanego „Zastosowanie precyzyjnej dokumentacji 3D obiektów zabytkowych w urzeczywistnieniu idei konserwacji prewencyjnej"[6].

Aktualnie istnieją cztery główne bezstykowe techniki pomiarowe, które mogą być zastosowane w procesie digitalizacji 3D[7]: triangulacja laserowa, fotogrametria, metoda czasu przelotu wiązki i metoda z oświetleniem strukturalnym. Każda z nich działa na innej zasadzie i w związku z tym charakteryzuje się innymi możliwościami. Dalej zostaną one krótko omówione.

Metoda triangulacji laserowej wykorzystuje znajomość zależności geometrycznych pomiędzy wiązką lasera, która rozprasza się na powierzchni badanej, a współrzędnymi jej obrazu rejestrowanego na detektorze. Wiązka występuje w postaci punktu lub linii. Metodę tę stosuje się zazwyczaj w przestrzeni roboczej o wymiarach nieprzekraczających 2 metrów. Niepewność pomiaru uzyskiwana w tej metodzie wynosi 1/10 000 w stosunku do wymiarów objętości pomia-

rowej, jednak nie więcej niż ±0,05 mm ze względu na wielkość plamki lasera na powierzchni obiektu. Przykładowo w objętości 1m x 1m x 1m niepewność pomiaru może sięgać ±0,1 mm. Niepewność pomiaru w konkretnym rozwiązaniu zależy także od wielu innych czynników i dla każdego systemu wyznaczana jest niezależnie. Metoda ta ma zastosowanie do powierzchni rozpraszających. Jej główną zaletą jest duża efektywność energetyczna, dzięki czemu pomiary mogą się odbywać w dzień. Główną wadą jest wymaganie skanowania promieniem lasera całej przestrzeni pomiarowej, co wymaga czasu i zachowania stabilnych warunków pomiaru.

Metoda fotogrametrii jest metodą pasywną, co oznacza, że nie wymaga aktywnej projekcji na analizowaną powierzchnię. Jej dokładność jest porównywalna z poprzednią metodą. Nie posiada ona żadnych ograniczeń związanych z objętością pomiarową. Polega na pobraniu zestawu obrazów w pełni odwzorowujących dokumentowany obiekt. Następnie należy ręcznie bądź półautomatycznie wskazać te same punkty obiektu na wszystkich zarejestrowanych obrazach. Na tej podstawie określany jest pełny opis geometryczny analizowanej sceny i obliczane są końcowe współrzędne (x, y, z) we wcześniej wyznaczonych punktach. Główną zaletą tej metody jest jej prostota i brak wymagania aktywnego oświetlania obiektu. Brak automatyzacji pomiaru i pomiar tylko w wybranych punktach należą do jej wad.

Metoda czasu przelotu wiązki polega na pomiarze czasu powrotu impulsu laserowego, który może być przekształcony na odległość dzięki znajomości prędkości światła w ośrodku. Pomiar całej powierzchni obiektu odbywa się poprzez sterowane obracanie projektowanej wiązki. Metoda ta pozwala na pomiary do kilku kilometrów przy niepewności maksymalnej rzędu ±4 mm (ze względu na ograniczenie dokładności pomiaru czasu powrotu impulsu). Metoda ta jest wskazana do pomiarów dużych obiektów.

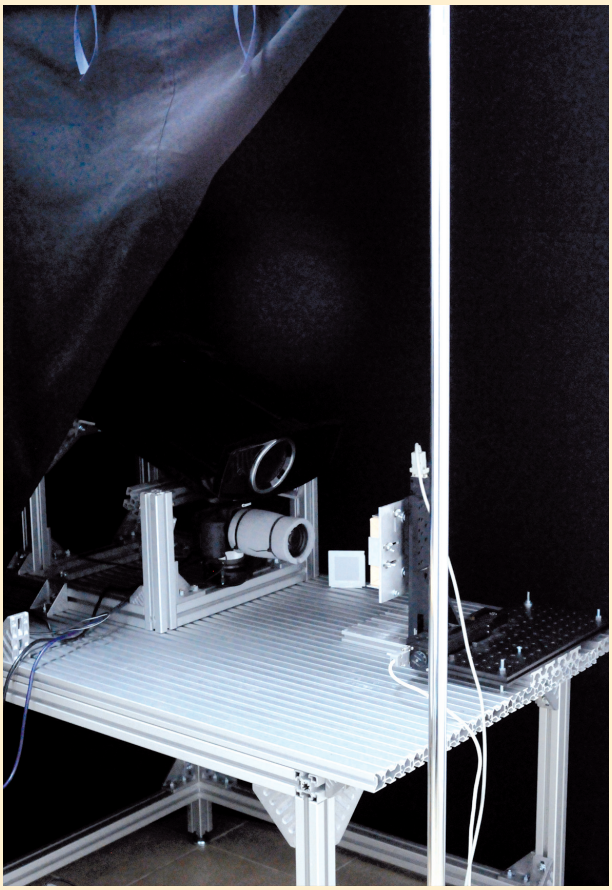
Metoda z oświetleniem strukturalnym parametrami jest najbardziej zbliżona do metody triangulacji laserowej. Polega ona na projekcji jednego bądź wielu obrazów na badaną powierzchnię. Na podstawie zdeformowanych obrazów rejestrowanych przez detektor wyznaczany jest kształt powierzchni obiektu. Metoda ta nie ma ograniczeń związanych z minimalną niepewnością. Możliwość pomiaru w całym polu i brak ruchomych części w systemie pomiarowym są głównymi zaletami tej metody. Konieczność oświetlenia całej badanej powierzchni jednocześnie uniemożliwia realizowanie pomiarów w pełnym świetle słonecznym, co jest główną wadą tej metody.

Proces digitalizacji 3D

Realizacja procesu digitalizacji 3D wymaga należytego zaplanowania i nadzoru merytorycznego. Po ustaleniu oczekiwanych parametrów technicznych danych cyfrowych oraz wyborze metody pomiarowej należy przygotować stanowisko pomiarowe oraz stanowisko do analizy i weryfikacji danych.

Stanowisko do digitalizacji 3D powinno uwzględniać cechy metody pomiarowej związane z następującymi elementami:

- oświetleniem zewnętrznym bądź jego brakiem (przykładowo metody aktywne, takie jak triangulacja laserowa lub metoda z oświetleniem strukturalnym działają optymalnie, jeśli całe stanowisko jest zaciemnione – zwiększa się wtedy ich tzw. stosunek sygnału do szumu – il. 2),
- stabilnością temperatury i wilgotności (każdy system pomiarowy projektowany jest do pracy w konkretnych warunkach – zazwyczaj zmiana



2. Przykładowe zaciemnienie stanowiska pomiarowego (Muzeum Pałac w Wilanowie)

2. Example of dimming the measurement station (Wilanow Palace Museum)

temperatury o kilka stopni powoduje, że wyniki pomiaru znacząco odbiegają od specyfikacji producenta),

- brakiem drgań (jest to szczególnie ważne w przypadku metod, dla których czas pomiaru z jednego kierunku jest długi – w przypadku drgań podczas jednego pomiaru zmienia się wzajemna pozycja między systemem pomiarowym a analizowaną powierzchnią, co skutkuje znaczącym zwiększeniem się błędu pomiarowego).

Istotnym elementem wpływającym na aranżację stanowiska pomiarowego jest wymaganie pomiaru obiektów z wielu kierunków i następnie łączenie tych pomiarów w jeden obiekt cyfrowy. Należy podjąć decyzję, czy wzajemna zmiana położenia obiektu względem systemu (il. 3) jest realizowana przez człowieka czy z zastosowaniem manipulatorów mechanicznych (stoliki obrotowe, liniowe lub roboty o wielu stopniach swobody). W niektórych przypadkach stanowisko należy zbudować wokół obiektu, a w niektórych możliwe jest przenoszenie obiektów do stacjonarnej pracowni (il. 4).

3. Przykładowe stanowisko pomiarowe do pomiarów obiektu obrotowo symetrycznego z zastosowaniem stolika obrotowego (Muzeum Pałac w Wilanowie)

3. Example of a measurement station used for measuring a symmetrical exhibit with the application of a turntable (Wilanow Palace Museum)

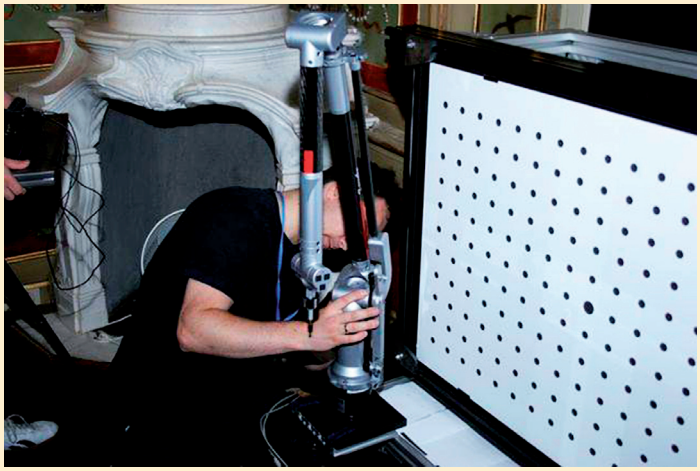
4. Przykład stanowiska zbudowanego wokół zabytkowego wazonu piaskowcowego znajdującego się w parku Muzeum Pałac w Wilanowie: a) widok z zewnątrz, b) widok w środku

4. Example of a station created around an historical sandstone vase in the park of Wilanow Palace Museum: a) view from the outside, b) view inside

Cały ruch obiektów, włącznie z ich przygotowaniem do pomiarów, powinien odbywać się pod nadzorem konserwatora dzieł sztuki. Manipulacja obiektem względem systemu lub zmiany w konfiguracji stanowiska pomiarowego powinny być także każdorazowo uzgadniane.

W przypadku kiedy wykonywany jest dodatkowo pomiar barwy, zalecane jest zastosowanie namiotu bezcieniowego. Jeśli nie jest to możliwe, to minimalnym do spełnienia wymaganiem powinno być wykonanie prawidłowego balansu bieli detektora uwzględniającego warunki oświetleniowe podczas pomiaru.

Jeśli warunki pomiarowe na stanowisku odbiegają od wyspecyfikowanych przez producenta, należy



5. Zdjęcie procesu kalibracji systemu pomiarowego przy obiekcie (Muzeum Pałac w Wilanowie)

5. Photograph of the calibration of the measurement system (Wilanow Palace Museum)

(Wszystkie fot. E. Bunsch, R. Sitnik)

przeprowadzić na nim kalibrację urządzenia (il. 5). Ważnym elementem procesu digitalizacji jest okresowe sprawdzanie poprawności wykonanych pomiarów. Można to zrealizować poprzez pomiar wcześniej przygotowanego wzorca o znanych wymiarach geometrycznych. Taka procedura daje pewność, że gromadzone wyniki są poprawne, a w przypadku wykrycia nieprawidłowości należy powtórzyć tylko te pomiary, które odbyły się po ostatniej weryfikacji.

Każdy etap procesu digitalizacji 3D należy dokumentować, wiążąc konkretne czynności z osobami za nie odpowiedzialnymi. Zastosowanie tej zasady pozwala na kontrolowanie jakości wykonywanych czynności oraz na identyfikację źródeł błędów zauważonych podczas realizacji digitalizacji 3D.

W bezpośredniej bliskości stanowiska do pomiarów należy zaplanować stanowisko do weryfikacji i analizy gromadzonych danych. Zadaniem operatora tego stanowiska jest takie przetworzenie danych, aby ich forma końcowa spełniała oczekiwane założenia techniczne. Do jego podstawowych czynności należy: filtracja i eliminacja błędnych punktów pomiarowych, łączenie danych pozyskanych z wielu kierunków oraz dostosowanie końcowego formatu danych.

Ostatnim elementem jest właściwe zabezpieczenie i udostępnianie danych cyfrowych. Owo zabezpieczenie powinno być wykonywane w sposób zapewniający ich trwałość oraz dostępność. Może być ono realizowane z zastosowaniem nowoczesnych technik archiwizacji z uwzględnieniem postulatu przechowywania danych w kilku lokalizacjach. Zabezpieczenie nie musi gwarantować szybkiego dostępu do danych. Udostepnienie danych powinno z kolei pozwalać na szybki i łatwy dostęp do obiektu cyfrowego dla użytkowników, którzy mają do tego prawa. Otwarte jest także pytanie, czy w tym zakresie pojawią się rozwiązania systemowe obejmujące regiony bądź cały kraj.

Podsumowanie i przyszłe prace

Digitalizacja 3D obiektów dziedzictwa kulturowego jest stosunkowo nowym zagadnieniem. Wiele ośrodków jest w trakcie wypracowywania własnych procedur realizacji procesu digitalizacji 3D. Jego właściwe zaplanowanie i nadzór nad wykonywaniem jest kluczowym elementem prowadzenia udanych kampanii digitalizacyjnych. Wskazówki przedstawione w tej publikacji wynikają z ponad siedmioletniego doświadczenia autorów w tym zakresie.

Wydaje się, że wypracowanie schematu przebiegu takiego procesu pozwoliłoby jednostkom i instytucjom dopiero go rozpoczynającym na uniknięcie wielu błędów i pomyłek, które zawsze się pojawiają podczas realizacji nowych i trudnych merytorycznie zagadnień.

W ramach przyszłych prac autorzy zamierzają sformalizować i zaproponować schemat planowania, realizacji i dokumentowania procesu digitalizacji 3D. Dodatkowo autorzy aktywnie rozwijają referencyjne systemy pomiarowe, uwzględniając zagadnienia związane z automatyzacją pomiaru[8] i przetwarzania danych[9] oraz rozszerzeniem możliwości pomiaru o kolorymetryczną barwę[10] oraz kątowe charakterystyki rozpraszania i odbicia[11].

Podziękowania

Przedstawione w projekcie wnioski są w dużej mierze efektem realizacji dwóch projektów: zadania „Digitalizacji 3D wybranej kolekcji zbiorów" realizowanego w ramach projektu POIiŚ (Programy Operacyjne Infrastruktura i Środowisko) „Rewitalizacja i digitalizacja osiemnastowiecznego zespołu pałacowo-ogrodowego w Wilanowie" oraz projektu badawczego N R17 0004 06 „Zastosowanie precyzyjnej dokumentacji 3D obiektów zabytkowych w urzeczywistnieniu idei konserwacji prewencyjnej" realizowanego w ramach VI konkursu projektów rozwojowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Przypisy

[1] E. Bunsch, R. Sitnik, *W stronę obiektywnej dokumentacji dzieła sztuki – praktyczne wykorzystanie skanerów z oświetleniem strukturalnym*, [w:] *Nowoczesne metody gromadzenia i udostępniania wiedzy o zabytkach*, red. A. Seidel-Grzesińska, K. Stanicka-Brzezicka, Wrocław 2008, s. 157–162.

[2] E. Modzelewska, R. Sitnik, *Odwzorowanie struktury powierzchni obiektu zabytkowego za pomocą skanu 3D*, [w:] *Nowoczesne metody gromadzenia i udostępniania wiedzy o zabytkach*, *op.cit*, s. 147–156.

[3] R. Sitnik, *Rejestracja kształtu i barwy przedmiotów 3D w zastosowaniach VR*, Materiały II edycji konferencji „Zapis obrazu, obraz zapisu", Warszawa 2007, s. 1–19.

[4] R. Sitnik, M. Karaszewski, *Optimized point cloud triangulation for 3D scanning systems*, „Machine Graphics & Vision International Journal" 2008, nr 17(4), s. 349–371.

[5] London Charter, http://www.londoncharter.org/; A. Bentkowska-Kafel, *Historyczna wiarygodność zabytku wirtualnego. Uwagi na marginesie postulatów Karty londyńskiej*, [w:] *Nowoczesne metody gromadzenia i udostępniania wiedzy o zabytkach*, red. A. Seidel-Grzesińska, K. Stanicka-Brzezicka, Wrocław 2008, s. 35–47.

[6] E. Bunsch, R. Sitnik, *Documentation instead of visualization – applications of 3D scanning in works of art analysis*, Proc. SPIE 75 *Odwzorowanie kształtu obiektów trójwymiarowych z wykorzystaniem oświetlenia strukturalnego*, OWPW, „Prace Naukowe – Mechanika" 2010 (231).

[8] R. Sitnik, M. Karaszewski, W. Załuski, P. Bolewicki, *Robotized structured* 31, 75310I, 2010.

[7] R. Sitnik, *Light system for automated 3D documenting of cultural heritage*, „Lasers in the Conservation of Artworks" 2011, VIII, s. 203–207.

[9] R. Sitnik, M. Karaszewski, *Automated processing of data from 3D scanning of cultural heritage objects*, LNCS 6436, 2010, s. 28–41.

[10] G. Mączkowski, R. Sitnik, J. Krzesłowski, *Integrated Method for 3D Shape and Multispectral Color Measurement*, „Journal of Imaging Science and Technology" 2011, nr 55(3), 030502–(10),.

[11] J. Krzesłowski, R. Sitnik, G. Mączkowski, *Integrated three-dimensional shape and reflection properties measurement system*, „Applied Optics" 2011, nr 50(4), s. 532–541.

Eryk Bunsch, Robert Sitnik

3D Digitalisation – from Premises to Digital Documentation

Techniques of the digitalisation of works of art are becoming an increasingly often recognised and applied instrument in the documentation of the preservation of exhibits. The obtained digital data can be transformed for many forms of use in scientific, conservation and educational undertakings. Once gathered, they can be transformed under the condition that their quality is sufficient. The latter is gained by technical parameters and suitable registration. The most universal form of the digitalisation of works of art is 2D documentation, as a rule realised with the assistance of flat scanners or digital cameras.

Recent years have witnessed the increasingly frequent use of 3D digital exhibits registered with 3D scanners. Data obtained with the help of such scanners assume the form of point clouds (x, y, z) or meshes rendering the shape of the surface of the original exhibits. In many cases, data concerning the shape are supplemented by information about the colour of the given exhibit in the form of point clouds, or texture, in the case of meshes. Owing to the fact that the 3D scanning technology is relatively new, the quality of 3D digital data differs – from very detailed 3D documentation to general images presented with the application of virtual reality techniques.

The authors of the article consider practical directives for the planning and realisation of 3D digitalisation, which starts with selecting the exhibits and defining the purposes of 3D digitalisation and the expected technical parameters of digital data. The next stage involves the choice of a suitable 3D measurement technique and planning the whole acquisition of data, which takes into account: indispensable conservation, the motion of the exhibits, conditions for scanning, calibration of the appliances, verification of the quality of the obtained data and documentation in the course of the entire process. The article also discusses ways of the archivisation and protection of the gained digital data. All directives are the outcome of scientific and documentation projections carried out by three collaborators: the Warsaw Polytechnic, the Wilanow Palace Museum and the Academy of Fine Arts in Warsaw.

Eryk Jerzy Bunsch, absolwent Wydziału Konserwacji i Restauracji Dzieł Sztuki ASP w Warszawie; od 2000 r. pracuje w Dziale Konserwacji Muzeum Pałac w Wilanowie; w latach 2001-2010 prowadził zajęcia kierunkowe z konserwacji zabytków archeologicznych w Instytucie Archeologii UW; uczestniczył w misjach archeologicznych w Bułgarii i Egipcie; od 2007 r. bierze udział w rozwijaniu technik precyzyjnego pomiaru 3D na potrzeby dokumentacji dzieł sztuki; kieruje projektami z zakresu konserwacji i badań rozwojowych; e-mail: jerzywart@yahoo.de

dr hab. inż. Robert Sitnik, wykładowca na Politechnice Warszawskiej; pracuje w Instytucie Mikromechaniki i Fotoniki na Wydziale Mechatroniki; naukowo zajmuje się rozwijaniem metod pomiaru 3D/4D, analizą danych 3D/4D oraz technikami rzeczywistości wirtualnej i wzbogaconej – autor lub współautor ponad 100 publikacji; od 2004 r. rozwija systemy pomiaru 3D oraz algorytmy analizy danych dostosowanych do wymagań związanych z dokumentacją obiektów zabytkowych; e-mail: r.sitnik@mchtr.pw.edu.pl