

# KRYTERIA DOBORU TECHNIKI 3D DO DOKUMENTACJI OBIEKTÓW DZIEDZICTWA KULTUROWEGO

**Eryk Bunsch**  
**Robert Sitnik**

© Narodowy Instytut Muzealnictwa  
i Ochrony Zbiorów, Warszawa 2014  
ISBN 978-83-64889-03-5

**Redaktor serii:** Robert Pasieczny  
**Redaktor zeszytu:** Anna Kuśmidrowicz-Król  
**Redakcja i korekta:** Marta Kołpanowicz

**Projekt okładki, opracowanie graficzne  
i łamanie:** Michał Wojciechowicz

**Druk:** Agencja Wydawnicza i Reklamowa AKCES Robert Nowicki

Digitalizacja w muzeach 2/2014



NARODOWY  
INSTYTUT MUZEALNICTWA  
I OCHRONY ZBIORÓW

ul. Goraszewska 7, 02-910 Warszawa  
tel. (+48 22) 25 69 600, fax (+48 22) 25 69 650  
e-mail: [biuro@nimosz.pl](mailto:biuro@nimosz.pl)  
[www.nimosz.pl](http://www.nimosz.pl)

# Wstęp

---

**TWORZENIE MOŻLIWIE NAJLEPSZEJ DOKUMENTACJI** obiektów dziedzictwa kulturowego jest statutowym obowiązkiem instytucji zajmujących się jego ochroną. W ciągu ostatnich kilkunastu lat, charakteryzujących się bardzo szybkim rozwojem cyfrowych technik dokumentacyjnych, nastąpiło uzupełnienie tradycyjnych technik dokumentacyjnych o całą grupę nowych metod związanych z możliwością trójwymiarowej rejestracji danych. Dane przestrzenne, oprócz gromadzenia informacji o kształcie dokumentowanych przedmiotów i ich wymiarach, mogą też opisywać cechy pozwalające na analizę stanu zachowania i techniki wykonania danego obiektu. Niniejsza publikacja ma na celu przybliżenie dostępnych obecnie technik trójwymiarowych muzealnikom, konserwatorom dzieł sztuki, archeologom oraz innym osobom zainteresowanym badaniem wytworów szeroko pojętej kultury materialnej<sup>1</sup>.

Wspólną cechą wszystkich technik tworzących przestrzenne wizerunki dokumentowanych obiektów jest sposób rejestracji danych – mają one postać chmur punktów, odwzorowujących kształt powierzchni mierzonych obiektów. Niekiedy, dla celów wizualizacyjnych, informacje te mogą być przetwarzane, np. do postaci siatki trójkątów. Możliwe jest także wzbogacanie danych o kształcie informacjami o barwie obiektu, które – zależnie od zastosowanej techniki pomiaru – informują o kolorze każdego punktu chmury lub, w przypadku siatek trójkątów, o kolorze bitmapowej tekstury. Obecnie prowadzone są też prace rozwojowe związane z poszerzeniem tych informacji o pomiar współczynników odbicia i rozpraszania światła, określanych angielskim skrótem BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*).

Ze względu na to, że wszystkie technologie skanowania trójwymiarowego są technikami stosunkowo młodymi, jakość pozyskanych za ich pomocą trójwymiarowych danych cyfrowych może być bardzo różna. Czasami dane te stanowią szczegółową i precyzyjnie oddającą rzeczywistość dokumentację 3D, czasami są jedynie próbą bardzo ogólnego oddania wizerunku przedmiotu na potrzeby technik rzeczywistości wirtualnej, tzw. wizualizacją. Szybki rozwój technik pomiarowych 3D i możliwości cyfrowego przetwarzania danych spowodował, że

---

<sup>1</sup> Bardziej szczegółowe informacje na ten temat można znaleźć w publikowanych przez NIMOSz opracowaniach: *Zalecenia dotyczące planowania i realizacji projektów digitalizacyjnych w muzealnictwie*, praca zbiorowa zespołu ekspertów powołanego przez Narodowy Instytut Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów, Warszawa 2011 oraz *Cyfrowe odwzorowania muzealiów – parametry techniczne, modelowe rozwiązania*, praca zbiorowa zespołu ekspertów powołanego przez Narodowy Instytut Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów, Warszawa 2012, a także w publikacjach, których lista znajduje się na końcu niniejszego opracowania.

techniki te nie doczekały się jeszcze standaryzacji. Stan taki może budzić nieufność niektórych środowisk i być przyczyną ostrożnego podejścia do stosowania tych technologii. Ocena ich przydatności i możliwości praktycznego zastosowania zależy przede wszystkim od jasno sformułowanego celu tworzenia reprezentacji trójwymiarowej i precyzyjnie zdefiniowanych oczekiwań końcowego użytkownika. Trójwymiarowe techniki dokumentacyjne nie są uniwersalną odpowiedzią na wszystkie problemy związane z dokumentacją obiektów zabytkowych. Odpowiednio użyte, mogą być jednak bardzo pożytecznym narzędziem, oferującym zupełnie nowy wachlarz możliwości prezentacyjnych, dokumentacyjnych i analitycznych.

Niektóre z opisywanych w tej publikacji technologii są stale rozwijane i z biegiem czasu oferować będą coraz większe możliwości dokumentacyjne. Postępująca automatyzacja procesu zbierania i przetwarzania danych pomiarowych skutkować będzie w przyszłości skróceniem czasu potrzebnego na dokumentację jednego obiektu i przyczyni się do znacznego obniżenia kosztów całego procesu. Jednak już dzisiaj wiele trójwymiarowych technik pomiarowych jest rozwiniętych w stopniu wystarczającym, by zagwarantować przydatność zbieranych danych także za trzydzieści – czterdzieści lat. Chcąc np. rozwijać metody badawcze oparte na precyzyjnym śledzeniu zmian, jakie zachodzą na powierzchni obiektów zabytkowych, musimy jak najszybciej zacząć gromadzić dane porównawcze z cyklicznie wykonywanych pomiarów, przy czym konieczne jest określenie minimalnych wymagań technicznych, jakie powinny one spełniać. Proces ten muszą wesprzeć środowiska techniczne, poprzez wypracowanie dojrzałych rozwiązań technologicznych, natomiast po stronie końcowych użytkowników kluczowe jest zrozumienie zakresu zastosowań i ograniczeń związanych z każdą z zastosowanych metod pomiarowych.

# I. Proces dokumentacji 3D

---

**PRZEZ DOKUMENTACJĘ TRÓJWYMIAROWĄ ROZUMIEMY** cyfrową reprezentację geometrii powierzchni mierzonego obiektu, wykonaną z określoną dokładnością i rozdzielczością. Taka podstawowa reprezentacja może być uzupełniona o dodatkowe wartości określone dla każdego punktu pomiarowego, takie jak barwa lub wektory normalne.

Dane, które nie spełniają wymogu znanej i zachowanej dokładności odwzorowania, mogą być wykorzystane do zastosowań wizualizacyjnych i prezentacyjnych, ale nie powinny być traktowane jak dokumentacja.

Poprawnie wykonana dokumentacja trójwymiarowa pozwala na odtworzenie geometrii obiektu w każdym jego punkcie (oczywiście poza obszarami, które nie mogą zostać zmierzone ze względu na ograniczenia danej metody pomiarowej). Im większa dokładność odwzorowania powierzchni mierzonego przedmiotu, tym większa wartość dokumentacyjna takich danych. Dla przeważającej części materiałów, z których wykonane są obiekty zabytkowe, optymalna rozdzielczość przestrzenna pomiaru zapewniająca zarejestrowanie wszystkich istotnych cech powierzchni wynosi około 2500 punktów pomiarowych na mm<sup>2</sup>.<sup>2</sup> Dane pomiarowe o wysokiej rozdzielczości przestrzennej zawsze można poddać uproszczeniom w celu stworzenia wizualizacji. Natomiast pomiary wykonane wyłącznie w celach wizualizacyjnych mają znikomą wartość dokumentacyjną. Dla przykładu dane z metrologicznie weryfikowanych pomiarów można użyć do wykonania precyzyjnej rekonstrukcji geometrii fragmentu obiektu w technice druku trójwymiarowego (np. z dokładnością rzędu 40 μm). Podobny zabieg da niezadowalające wyniki, jeżeli zostanie przeprowadzony w oparciu o pomiary wizualizacyjne nawet bardzo realistycznie wyglądającego obiektu. W tym drugim przypadku w wielu punktach powierzchni kształt obiektu nie został zmierzony, a jedynie zasymulowany w oparciu o przetworzenie danych z sąsiadujących punktów charakterystycznych.

---

<sup>2</sup> Rozdzielczości przestrzennej wynoszącej 2500 punktów na mm<sup>2</sup> nie należy traktować jako optymalnej w każdym możliwym przypadku, jednak w efekcie badań przeprowadzonych w ramach projektu badawczego N R17 0004 06/2009 „Zastosowanie precyzyjnej dokumentacji 3D obiektów zabytkowych w urzeczywistnieniu idei konserwacji prewencyjnej” rozdzielczość ta okazała się optymalna dla większości z ponad 60 przebadanych prób materiałowych. Ustalenia te potwierdzają także niezależnie prowadzone badania brytyjskie, których efekty opublikowane zostały w artykule L. MacDonald „The Limits of Resolution” (EVA Conference, London 2010).

Poprawne przeprowadzenie procesu digitalizacji 3D nie sprowadza się wyłącznie do etapu gromadzenia i przetwarzania danych pomiarowych. Niezwykle istotny jest zarówno okres przygotowawczy, obejmujący planowanie, jak i kontynuacja procesu, związana z jednej strony z odpowiednim zabezpieczeniem pozyskanych danych, a z drugiej z takim udostępnieniem, które umożliwiłoby pełne wykorzystanie ich potencjału badawczego. Przygotowanie do przeprowadzenia dokumentacji cyfrowej należy rozpocząć od dokładnego określenia celów tego procesu. Opierając się na analizie grupy obiektów przeznaczonych do digitalizacji i precyzyjnie zdefiniowanych planowanych efektach projektu, określić należy minimalne parametry techniczne, które zagwarantują osiągnięcie zakładanych celów. Kolejny etap obejmuje wybór właściwej techniki pomiaru trójwymiarowego i planowanie całego procesu 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 oraz określić, jakiego typu oprogramowanie użytkowe wykorzystywane będzie przez końcowych użytkowników tworzonej dokumentacji.

### 1.1. CELE DOKUMENTACJI 3D

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

- utworzenie cyfrowej kopii wzorcowej – wiernej, cyfrowej reprezentacji kształtu powierzchni obiektu, odwzorowanej z takim poziomem szczegółowości, że nawet zastosowanie w przyszłości dokładniejszej metody pomiaru nie pozwoli na uzyskanie nowych merytorycznie informacji o obiekcie. Cyfrowa kopia wzorcowa może być wykorzystana do utworzenia każdej innej cyfrowej reprezentacji obiektu, bez względu na wymagany zakres zastosowań;
- dokumentacja stanu zachowania obiektu do celów konserwatorskich – 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 służb konserwatorskich podczas bieżących prac, ale zazwyczaj nie jest tak wymagający jak kopia wzorcowa. Tego typu dane powinny być wystarczające do tworenia metodą druku trójwymiarowego modeli oddających w precyzyjny sposób kształt odwzorowywanego obiektu;
- utworzenie cyfrowej reprezentacji obiektu do prezentacji w czasie rzeczywistym – reprezentacja cyfrowa wizerunku obiektu utworzona zazwyczaj w postaci siatki trójkątów lub uproszczonej chmury punktów z przeznaczeniem do prezentacji w internecie. Ze względu na ograniczenia wielkości i szczegółowości obiektu reprezentacja ta oddaje tylko przybliżony wygląd obiektu.

Ze względu na ograniczenia metod pomiarowych (przysłonięcia, otwory itp.) stosowane obecnie techniki pomiarowe nie pozwalają na dokumentowanie całej powierzchni skompli-

kowanych obiektów. W procesie tworzenia dokumentacji trójwymiarowej wszystkie niedo-  
mierzone obszary powierzchni obiektu powinny zostać opisane w technicznych metadanych  
opisowych. Przestrzeganie takiej procedury daje możliwość precyzyjnego zweryfikowania,  
z jaką starannością zebrano dane pomiarowe. Warto zwrócić uwagę na to, że przy tworze-  
niu reprezentacji do wizualizacji w internecie zazwyczaj uzupełniane są fragmenty, które nie  
mogły zostać pomierzone. Autorzy, zgodnie z postulatami Karty Londyńskiej, sugerują, aby  
w takich przypadkach jednoznacznie zdefiniować, co zostało zmierzone (dokumentacja), a co  
uzupełnione na etapie modelowania (kreacja). Postulaty Karty Londyńskiej dostępne są tak-  
że w języku polskim na stronie: <http://www.londoncharter.org/downloads.html>.

## 1.2. OKREŚLENIE WYMAGANYCH PARAMETRÓW TECHNICZNYCH METODY POMIAROWEJ

Po wyborze obiektów i określeniu celu lub celów digitalizacji 3D należy wyspecyfikować, ja-  
kimi wymaganiami technicznymi mają się charakteryzować końcowe dane cyfrowe, które  
chcemy uzyskać w trakcie realizacji projektu. Po uwzględnieniu parametrów powierzchni  
obiektów, ich kształtu oraz wymagań technicznych dla końcowych danych należy wybrać op-  
tymalną technikę pomiaru. Dodatkowo, po wyborze techniki pomiaru należy zapewnić wła-  
ściwe warunki, w których proces ten będzie realizowany (np. stała temperatura i wilgotność  
w czasie pomiaru lub odpowiednie zaciemnienie pomieszczenia).

Do głównych parametrów technicznych, jakimi powinny się charakteryzować dane pomia-  
rowe, należą:

- rozdzielczość przestrzenna danych – definiowana jako minimalna odległość między punktami pomiarowymi  $(x, y, z)$  odwzorowującymi kształt powierzchni badanego obiektu; wartość ta może być wyrażana jako liczba punktów pomiarowych na  $\text{mm}^2$ ;
- dokładność pomiaru – definiowana jako miara błędów, z którą wyznaczany jest każdy z rejestrowanych punktów  $(x, y, z)$ ; jest ona wyrażana w milimetrach;
- odwzorowanie barwy – określające, przy jakich warunkach oświetleniowych pobrana została barwa obiektu w każdym punkcie  $(x, y, z)$ ;
- 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, parametry pomiaru należy dobierać indywidualnie dla każdej grupy obiektów. Obecnie na świecie nie istnieją standardy lub wytyczne definiujące wartości tych wskaźników.

## 1.3. PROCES DIGITALIZACJI 3D

Realizacja procesu digitalizacji 3D wymaga należytego zaplanowania i nadzoru merytorycznego. Po ustaleniu oczekiwanych w projekcie parametrów technicznych danych cyfrowych

i po dokonaniu wyboru metody pomiarowej należy przygotować stanowisko pomiarowe oraz stanowisko do analizy i weryfikacji danych.

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

- oświetleniem zewnętrznym bądź jego brakiem (np. metody aktywne, takie jak triangulacja laserowa lub metoda z oświetleniem strukturalnym, działają optymalnie, jeśli całe stanowisko jest zaciemnione – zwiększa się wtedy tzw. stosunek sygnału do szumu);
- stabilnością temperatury i wilgotności (każdy system pomiarowy jest projektowany do pracy w konkretnych warunkach – zazwyczaj zmiana temperatury o kilka stopni powoduje, że wyniki pomiaru znacząco odbiegają od specyfikacji producenta);
- brakiem drgań (parametr ten jest szczególnie istotny 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 wymóg pomiaru obiektów z wielu kierunków i następnie łączenie tych pomiarów w jeden obiekt cyfrowy. Należy podjąć decyzję, czy wzajemna zmiana położenia obiektu względem systemu 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 niekiedy możliwe jest przenoszenie obiektów do stacjonarnej pracowni.

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 uzgodnione.

W przypadku wykonywania pomiaru barwy zalecane jest zastosowanie namiotu bezcieniowego. Jeśli nie jest to możliwe, minimalnym wymaganiem, które należy spełnić, powinno być wykonanie dla używanego detektora (aparatu cyfrowy, kamera przemysłowa) prawidłowego balansu bieli, uwzględniającego warunki oświetleniowe, które będą panowały podczas pomiaru.

Jeśli warunki pomiarowe na stanowisku odbiegają od wyspecyfikowanych przez producenta, należy przeprowadzić kalibrację urządzenia na stanowisku. Następnie w trakcie wykonywania pomiarów zalecane jest okresowe sprawdzanie ich poprawności. Można tego dokonać poprzez cykliczny pomiar wcześniej przygotowanego wzorca o znanych wymiarach geometrycznych. Stosowanie takiej procedury daje pewność, że gromadzone wyniki są poprawne. W przypadku wykrycia nieprawidłowości należy powtórzyć tylko te pomiary, które zostały wykonane od czasu ostatniej weryfikacji.

Każdy etap procesu digitalizacji 3D należy dokumentować, przypisując konkretne czynności osobom za nie odpowiedzialnym. 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. Podstawowe czynności wykonywane na tym stanowisku to: filtracja i eliminacja błędnych punktów pomiarowych, łączenie danych pozyskanych z wielu kierunków oraz dostosowanie końcowego formatu danych.

Ostatnimi elementami procesu są właściwe zabezpieczenie i udostępnienie danych cyfrowych. Zabezpieczanie danych powinno być wykonywane w sposób zapewniający ich trwałość oraz dostępność. Zadanie to można realizować z zastosowaniem nowoczesnych technik archiwizacji, z uwzględnieniem postulatu przechowywania danych w kilku lokalizacjach. Zabezpieczenie kopii zapasowych nie musi gwarantować szybkiego dostępu do danych. Udostępnienie danych powinno z kolei pozwalać na szybki i łatwy dostęp do obiektu cyfrowego dla użytkowników, którzy są do tego uprawnieni.

## II. Przegląd technik pomiarowych

---

**TECHNIKI POMIAROWE MOŻNA PODZIELIĆ** na aktywne i pasywne. W technikach aktywnych system pomiarowy emituje w kierunku obiektu pomiarowego wiązkę określonego typu promieniowania. Interakcja wiązki z powierzchnią jest rejestrowana przez detektor i w oparciu o analizę wyniku uzyskuje się informacje o wartości mierzonej. Na podstawie automatycznej analizy zarejestrowanych obrazów wyznacza się współrzędne projektowanych wzorców na powierzchni badanego obiektu. W niektórych przypadkach bada się stopień pochłaniania padającego promieniowania. Techniki pasywne z kolei to takie, w których wykorzystuje się tylko oświetlenie zastane, zazwyczaj słoneczne.

Poniżej przedstawiono zestawienie omówionych metod pod kątem ich zastosowania oraz różnych parametrów pomiaru 3D, które dzięki tym metodom można uzyskać.

### 2.1. PASYWNE TECHNIKI POMIAROWE

W pierwszej kolejności przedstawiamy techniki pasywne. Ponieważ nie emitują one w kierunku obiektu mierzonego żadnego typu promieniowania, ich zastosowanie nie wiąże się z ograniczeniami konserwatorskimi dla danej grupy zabytków.

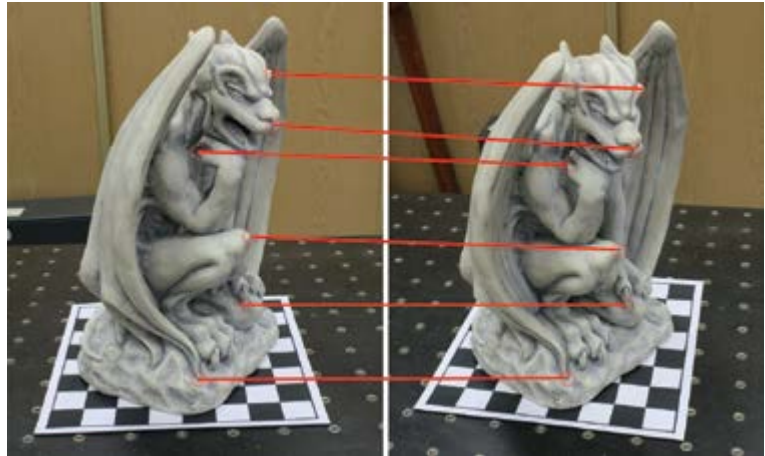
#### 2.1.1. FOTOGRAMETRIA

Fotogrametria jest techniką bardzo powszechnie stosowaną do budowy modeli 3D dużych obiektów (budynki, struktury przemysłowe itp.) w zastosowaniach profesjonalnych. Do jej poprawnego użycia wymagana jest fachowa wiedza z obszaru pomiarów oraz zastosowanie wyspecjalizowanego oprogramowania. Modele 3D utworzone z jej pomocą charakteryzują się określoną dokładnością wynikającą z zastosowanego sprzętu i procedur przetwarzania danych.

Do pomiaru wykorzystuje się co najmniej dwa zdjęcia analizowanej sceny. Zdjęcia wykonywane są detektorem (aparatem) o znanych parametrach odwzorowania optycznego (tzw. detektorem skalibrowanym). Kalibracja detektora prowadzi do przypisania współrzędnym rejestrowanych obrazów (poszczególnym pikselom) równań prostych znajdujących się za detektorem z układem optycznym (obiektywem). Po zarejestrowaniu zestawu zdjęć pomiarowych na kilku zdjęciach (co najmniej dwóch; patrz il. 1) znajdują się poszczególne punkty obiektu i następ-

nie, na podstawie ich współrzędnych  $i, j$  (automatycznie zamienianych na równania prostych) oraz przekształceń geometrycznych pozycji detektora w poszczególnych zdjęciach, wyznacza się ich współrzędne  $x, y, z$ . Współrzędne  $x, y, z$  wyznaczane są tylko w punktach charakterystycznych, dających się łatwo zlokalizować na poszczególnych zdjęciach (np. przy tworzeniu modelu budynku będą to narożniki okien i drzwi). Pozostałe punkty na powierzchni obiektu wyznaczane są w sposób przybliżony na podstawie interpolacji współrzędnych punktów charakterystycznych.

*Il. 1. Wizualizacja poszukiwania tych samych punktów obiektu na zdjęciach wykonanych z różnych kierunków. Źródło: opracowanie własne*



Technika ta może być stosowana do obiektów o zróżnicowanej powierzchni, tzn. takiej, której cyfrowe zdjęcia ukazują wiele możliwych do zidentyfikowania punktów charakterystycznych. Tylko w takich punktach wyznaczane są współrzędne  $x, y, z$ . Przykładowo na białej matowej powierzchni nie zostaną wyznaczone żadne punkty. Warto też zwrócić uwagę na to, że jeśli w interesującym nas fragmencie powierzchni nie będzie punktów charakterystycznych, to ten fragment zostanie zarejestrowany jako płaszczyzna. W rzeczywistości ta powierzchnia może być płaska, wypukła lub wklęsła, jednak bez punktów charakterystycznych tą metodą nie jesteśmy w stanie tego pomierzyć. Aby zaradzić temu problemowi, często na powierzchnię obiektu nanosi się sztucznie specjalne znaczniki, które zwiększają liczbę punktów charakterystycznych.

Zalety fotogrametrii:

- brak ograniczeń związanych z wymiarami obiektów,
- stosunkowo nieduże nakłady na sprzęt do digitalizacji,
- realistycznie wyglądające modele 3D (tekstutowanie siatek trójkątów).

Wady fotogrametrii:

- współrzędne  $(x, y, z)$  wyznaczane są tylko w punktach charakterystycznych,
- trudność w automatyzacji całego procesu – wymagany jest udział wykwalifikowanej obsługi.

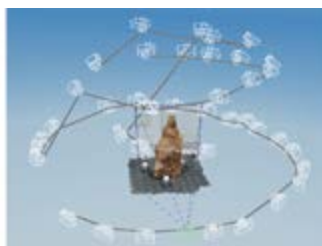
Najbardziej popularne pakiety oprogramowania wspomagające realizację pomiarów fotogrametrycznych zamieszczone są na stronie: [http://en.wikipedia.org/wiki/Photogrammetry#Current\\_suite\\_of\\_software](http://en.wikipedia.org/wiki/Photogrammetry#Current_suite_of_software).

### 2.1.2. MODELE ZE ZDJEĆ

Technika SfM (ang. *Structure from Motion* – SfM), podobnie jak fotogrametria, pozwala na tworzenie modeli 3D ze zdjęć. Jednak jest ona stosowana głównie do odwzorowania 3D bez dużych wymagań jakościowych związanych z reprezentacją geometrii 3D, czyli głównie do wizualizacji. Technika ta nie wymaga skalibrowanego detektora, a całe przetwarzanie danych odbywa się automatycznie (jednak nie zawsze końcowy model jest poprawny).

Wynikiem końcowym jest model 3D, który nie jest wyskalowany. Oznacza to, że proporcje pomiędzy poszczególnymi jego fragmentami są zachowane, jednak wymiary stworzonego obiektu trójwymiarowego nie są skalowane w odniesieniu do wymiarów obiektu mierzono. Ten efekt procesu digitalizacyjnego może wprowadzić w błąd użytkownika wytworzonych danych, gdyż bez posiadania danych metrycznych z innego źródła nie jest on w stanie określić wielkości wizualizowanego obiektu. Chcąc przyporządkować stworzony wizerunek do wielkości realnie istniejącego, dokumentowanego obiektu, należy dodatkowo wskazać na modelu 3D znany wymiar i ręcznie go przeskalować.

W tej technice do pomiaru wykorzystuje się także co najmniej dwa zdjęcia dokumentowanego obiektu. Zdjęcia te poddawane są automatycznej analizie mającej na celu znalezienie tych samych fragmentów obiektu na różnych zdjęciach. W kolejnym etapie każde zdjęcie jest podstawą do utworzenia wirtualnej pozycji detektora w przestrzeni wokół obiektu i jednocześnie do określenia parametrów tego detektora uwzględniających zastosowany układ optyczny (uwzględniane są takie parametry, jak: ogniskowa, względne wymiary pikseli, aberracje geometryczne obiektywu, a w niektórych rozwiązaniach także inne). Przykładową wizualizację tego etapu zaprezentowano na il. 2.



Il. 2. Wizualizacja wyznaczenia wzajemnych pozycji detektora w technice SfM. Źródło: opracowanie własne

Po zakończeniu tego etapu punkty charakterystyczne tworzą wstępny model 3D. Ostatnim elementem przetwarzania jest utworzenie tzw. „gęstej” chmury punktów, polegające na analizie każdej z par zdjęć sąsiadujących i wyznaczeniu dodatkowych punktów już przy znajomości wzajemnego położenia geometrycznego poszczególnych ujęć. Przykładowa wizualizacja „gęstej” chmury punktów widoczna jest na il. 3. Wynikiem przetwarzania, w zależności

od możliwości oprogramowania i preferencji użytkownika, może być chmura punktów, siatka trójkątów z teksturą lub bez (il. 4).



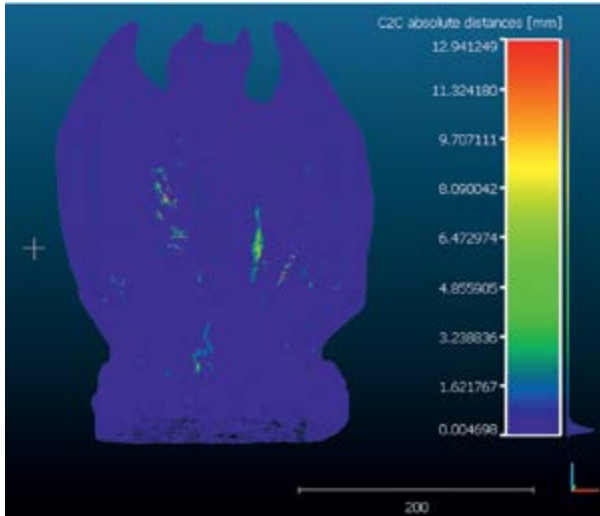
Il. 3. Etapy przetwarzania danych w technice SfM: a) geometria 3D utworzona na podstawie punktów charakterystycznych, b) „gęsta” chmura punktów. Źródło: opracowanie własne



Il. 4. Siatka trójkątów uzyskana z wykorzystaniem techniki SfM: a) siatka trójkątów bez tekstury, b) z teksturą.

Źródło: opracowanie własne

Technika SfM może być stosowana do tej samej grupy obiektów co fotogrametria. Warto zwrócić uwagę, że w różnych obszarach obiektu wierność odwzorowania geometrii 3D może być różna (zależnie od liczby i rozłożenia punktów charakterystycznych na powierzchni obiektu) i jest trudna do przewidzenia (il. 5).



Il. 5. Wizualizacja błędów odwzorowania geometrii 3D w każdym punkcie.  
Źródło: opracowanie własne

Zalety techniki SfM:

- brak ograniczeń związanych z wymiarami obiektów,
- stosunkowo nieduże nakłady na sprzęt do digitalizacji,
- realistycznie wyglądające modele 3D.

Wady techniki SfM:

- błędy, jakie generuje ta technika, są tak duże, że powstałe modele nie mogą być używane do dokumentacji 3D, znajdują one zastosowanie jedynie przy wizualizacji;
- ze względu na to, że cały proces przetwarzania danych przebiega automatycznie i polega na generowaniu punktów powierzchni modelu w oparciu dane o różnym stopniu precyzji, efekt modelowania jest trudny do przewidzenia. Końcowy wynik procesu nie może zostać zweryfikowany przez samo oprogramowanie i może zawierać duże błędy w odwzorowaniu geometrii. Na końcu procesu należy samodzielnie ocenić stopień akceptowalności stworzonego modelu;
- wymagane jest dodatkowe skalowanie całego modelu.

Najbardziej popularne pakiety oprogramowania wspomagające pomiary SfM można znaleźć na stronie: [http://en.wikipedia.org/wiki/Structure\\_from\\_motion#Structure\\_from\\_Motion\\_software\\_toolboxes](http://en.wikipedia.org/wiki/Structure_from_motion#Structure_from_Motion_software_toolboxes).

## 2.2. AKTYWNE TECHNIKI POMIAROWE

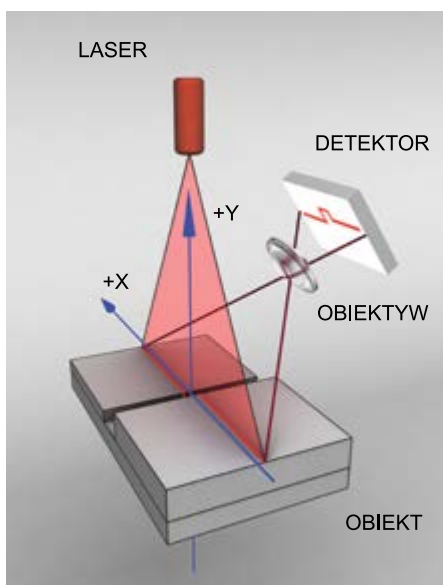
### 2.2.1. TRIANGULACJA LASEROWA

Triangulacja laserowa jest najdłużej stosowaną techniką aktywną służącą do obrazowania trójwymiarowego. W przeciwieństwie do technik pasywnych charakteryzuje się równomiernym rozłożeniem punktów pomiarowych o współrzędnych  $x, y, z$  na powierzchni obiektu.

Typowy układ triangulacji laserowej zbudowany jest ze źródła laserowego sztywno połączonego z kamerą oraz jednostki obliczeniowej do przetwarzania danych. Układowi źródła laserowego towarzyszy zazwyczaj moduł formowania wiązki pozwalający na rzutowanie punktu, linii lub zestawu linii na powierzchnię obiektu mierzzonego. Jeśli rzutowany jest punkt, to dodatkowo istnieje możliwość zmiany kierunku projekcji w dwóch osiach, co pozwala na pomiar w zadanym polu pomiarowym. W przypadku projekcji linii zmiana kierunku rzutowania odbywa się tylko wzdłuż jednej osi (il. 6). Do zmiany kierunku projekcji w jednej osi zazwyczaj wykorzystuje się obrotowe zwierciadło, a w przypadku rzutowania punktu – dwa zwierciadła. Rzutowany punkt bądź linia rozpraszają się na powierzchni obiektu i obraz tego rozproszenia rejestrowany jest na detektorze umieszczonym w określonej odległości od źródła.

Geometria 3D obrazowanej powierzchni wyznaczana jest w następujący sposób:

- detektor wraz z układem optycznym kalibrowany jest geometrycznie – w efekcie każda współrzędna  $i, j$  w obrazie może być przekształcona w prostą w przestrzeni pomiarowej (podobnie jak przy zastosowaniu fotogrametrii);



Il. 6. Wizualizacja zasady działania metody triangulacji laserowej w przypadku projekcji linii.  
Źródło: opracowanie własne

- w przypadku rzutowania punktu współrzędne  $x$ ,  $y$ ,  $z$  wyznaczone są jako wynik przecięcia się odpowiedniej prostej pochodzącej z detektora (wyznaczonej dla współrzędnych detektora  $i$ ,  $j$  reprezentujących środek ciężkości plamki laserowej na obrazie) z prostą reprezentującą rzutowany punkt;
- w przypadku projekcji rzutowania linii współrzędne  $x$ ,  $y$ ,  $z$  wyznaczone są jako wynik przecięcia się zbioru prostych pochodzących z detektora z płaszczyzną rzutowania linii.

Triangulacja laserowa może być stosowana do pomiarów geometrii 3D dowolnej powierzchni rozpraszającej światło. Wynikiem pomiaru jest chmura punktów o współrzędnych  $x$ ,  $y$ ,  $z$  obrazująca współrzędne powierzchni w obszarach oświetlonych przez źródło laserowe i zarejestrowanych przez kamerę. Typowe wymiary pola pomiarowego wynoszą od kilkudziesięciu centymetrów do 2 m. Dokładność, jaką pozwalają uzyskać systemy triangulacji laserowej, wynosi średnio 1/10 000 wielkości pola pomiarowego (np. dla wielkości pola równej 1 m x 1 m dokładność wynosi około 0,1 mm). Dodatkowo, ze względu na rozmiar plamki laserowej na obiekcie, wynoszący ponad 0,5 mm, dolna granica niepewności pomiaru wynosi zazwyczaj 0,05 mm i nie zmniejsza się wraz ze zmniejszaniem się wymiarów pola pomiarowego. Warto też zwrócić uwagę, że ze względu na skomplikowaną budowę oraz występowanie precyzyjnych i ruchomych elementów optycznych skanery te zazwyczaj są budowane w sposób umożliwiający pracę w jednej zadanej objętości, jedynie z ewentualną zmianą rozdzielczości projektowania linii lub punktów. Metoda pomiaru może być rozszerzona o obrazowanie barwy poprzez zastosowanie detektora barwnego. Wtedy każdy punkt pomiarowy będzie dodatkowo zawierał współrzędne trójchromatyczne barwy (RGB, ang. *red*, *green*, *blue*).

Zalety techniki triangulacji laserowej:

- równomierne próbkowanie geometrii 3D badanej powierzchni niezależnie od jej charakterystyki barwnej (oczywiście dotyczy to tylko powierzchni rozpraszających);
- dzięki tej metodzie każdy punkt pomiarowy charakteryzuje się określoną niepewnością pomiaru (zależną od zastosowanego systemu oraz warunków pomiaru);
- dzięki projekcji punktu lub linii może być stosowana nawet w oświetleniu słonecznym.

Wady techniki triangulacji laserowej:

- skanowanie przy pomocy rzutowanego punktu bądź linii wymaga odpowiedniej budowy aparatu, który zawiera wewnątrz obudowy ruchome części, co skutkuje dużą wrażliwością na rozkalibrowanie i uszkodzenia;
- rzutowanie punktu bądź linii powoduje, że czas pomiaru jest dość długi;
- urządzenia działają w jednym trybie lub kilku trybach pomiarowych, jednak we wszystkich przypadkach rozdzielczość przestrzenna pomiaru jest stała i określona dla stałego pola pomiarowego.



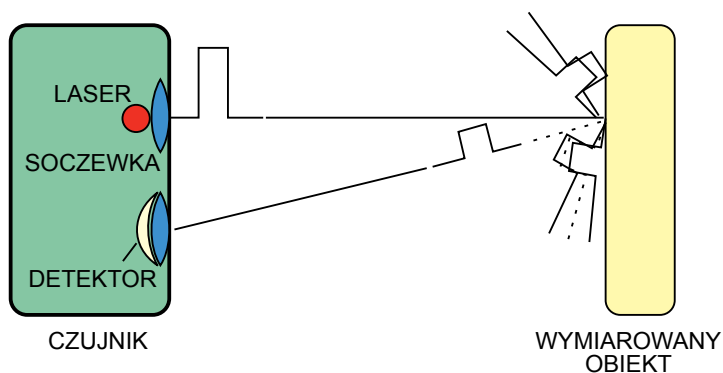
Przykłady najbardziej popularnych rozwiązań z zastosowaniem systemów triangulacji laserowej do dokumentacji dziedzictwa kulturowego można znaleźć na stronie: [http://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_scanner#Triangulation](http://en.wikipedia.org/wiki/3D_scanner#Triangulation).

### 2.2.2. METODA CZASU PRZELOTU WIĄZKI

Metoda czasu przelotu wiązki (ang. *Time of Flight* – ToF) stosowana jest do pomiarów geometrii 3D powierzchni dużych obiektów lub obszarów, zazwyczaj sięgających od kilkunastu metrów do kilku kilometrów. Systemy ToF występują w wersjach do pomiarów obiektów statycznych lub dynamicznych (poruszających się lub zmiennych). Do obrazowania 3D powierzchni obiektów dynamicznych stosuje się układ detektora powierzchniowego (matryca pikseli), jednak ze względu na niską dokładność pomiaru systemy te nie mają jeszcze zastosowania w dokumentacji obiektów dziedzictwa kulturowego.

Układ realizujący pomiar ToF składa się z lasera, który może generować bardzo krótkie impulsy świetlne, detektora promieniowania, układu optycznego i mechanicznego. Laser emituje krótki impuls świetlny w kierunku badanej powierzchni (il. 7). Impuls rozprasza się na niej i część jego energii obrazowana jest na detektorze, wyposażonym w filtry spektralne dostosowane do długości fali promieniowania z lasera. Detektor rejestruje, jaki czas upłynął od momentu emisji impulsu do jego powrotu (uwzględniając prędkość światła w powietrzu), i na tej podstawie wyznaczana jest odległość od badanej powierzchni. Układ skanowania mechanicznego pozwala na przemieszczanie wiązki lasera w dwóch osiach prostopadłych, dzięki czemu możliwe jest obrazowanie dookólne. Ponieważ elementy mechaniczne skanera przesłaniają wiązkę, obrazowanie nie odbywa się w pełnym kącie sferycznym.

W nowocześniejszych rozwiązaniach stosuje się dodatkowo modulację sinusoidalną emitowanego impulsu i kilkakrotną rejestrację powracającej wiązki, dzięki czemu korzystając z metod wyznaczania przesunięcia fazowego, można uzyskać wyższe dokładności przy pomiarze odległości. Metoda ta może być rozszerzona, podobnie jak triangulacja laserowa, o obrazowanie barwy poprzez zastosowanie dodatkowego detektora barwnego. Wtedy każdy punkt pomiarowy o współrzędnych  $x$ ,  $y$ ,  $z$  będzie miał przypisane też współrzędne trójkolorowe (RGB).



Technika ToF jest stosowana od kilkudziesięciu lat, ale ze względu na występujące ograniczenia związane z dokładnością pomiaru czasu powrotu impulsu wykorzystuje się ją głównie do pomiarów dużych obiektów i układów przestrzennych. Z tego względu precyzja działania tego typu urządzeń jest w istotny sposób ograniczona. W najnowszych rozwiązaniach geometria 3D badanej powierzchni obrazowana jest z dokładnością  $\pm 4\text{mm}$  przy urządzeniu pomiarowym umieszczonym w odległości od kilkunastu do kilkudziesięciu metrów od powierzchni mierzonej. Taki zakres niepewności pomiaru powoduje, że technika ToF nie nadaje się do stosowania przy małych obiektach.

Zalety techniki ToF:

- równomierne próbkowanie geometrii 3D badanej powierzchni niezależnie od jej charakterystyki barwnej (oczywiście dotyczy to tylko powierzchni rozpraszających);
- dzięki tej metodzie każdy punkt pomiarowy charakteryzuje się określoną niepewnością pomiaru (zależną od zastosowanego systemu oraz warunków pomiaru);
- dzięki projekcji jednego punktu w danej chwili może być stosowana nawet w oświetleniu słonecznym.

Wady techniki ToF:

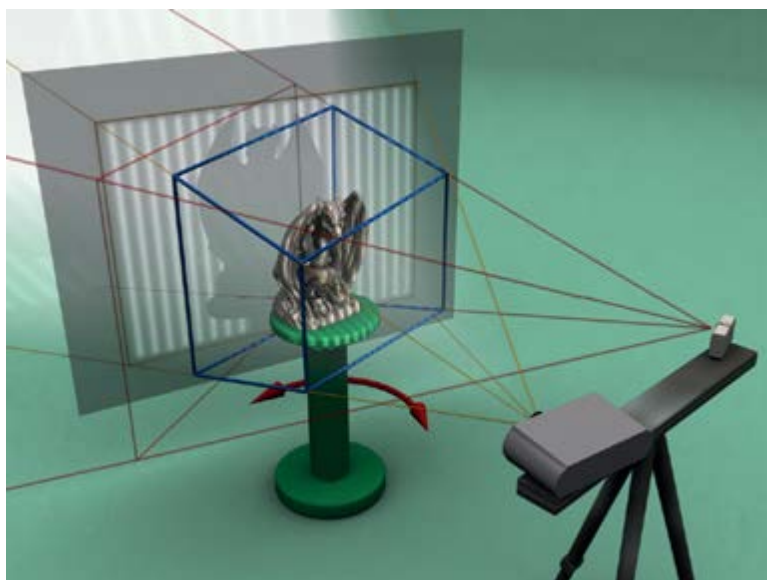
- skanowanie przy pomocy rzutowanego punktu wymaga odpowiedniej budowy aparatu, który zawiera wewnątrz obudowy ruchome części, co skutkuje dużą wrażliwością na rozkalibrowanie i uszkodzenia;
- skanowanie powierzchni za pomocą rzutowanego punktu powoduje, że czas pomiaru jest dość długi.

Przykłady najbardziej popularnych rozwiązań z zastosowaniem techniki ToF do dokumentacji dziedzictwa kulturowego można znaleźć na stronach: <http://www.faro.com/en-us/products/3d-surveying/faro-focus3d/overview>; [http://www.leica-geosystems.com/en/HDS-Laser-Scanners-SW\\_5570.htm](http://www.leica-geosystems.com/en/HDS-Laser-Scanners-SW_5570.htm).

### **2.2.3. METODA Z OŚWIETLENIEM STRUKTURALNYM**

Metoda z oświetleniem strukturalnym (ang. *structured light*) jest techniką do pomiarów geometrycznych 3D opracowaną stosunkowo niedawno. Rozpowszechniła się wraz z pojawieniem się technologii cyfrowej projekcji. Technika ta pozwala na równomierne próbkowanie badanej powierzchni, co w konsekwencji powoduje, że punkty pomiarowe o współrzędnych  $x$ ,  $y$ ,  $z$  także są równomiernie rozłożone na powierzchni obiektu.

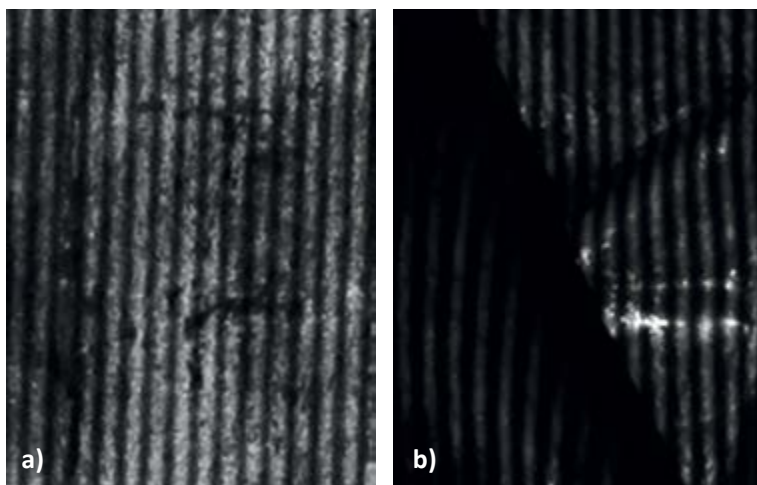
Typowy system z oświetleniem strukturalnym składa się z cyfrowego projektora rastrów, detektora, ramy mocującej oraz jednostki komputerowej sterującej pomiarem (il. 8). Cyfrowy projektor rastrów rzutuje na badaną powierzchnię jeden obraz bądź więcej obrazów. Po wyświetleniu każdego obrazu detektor rejestruje obraz rastrów zdeformowanych na powierzchni obiektu. W zależności od geometrii powierzchni obiektu badanego rastry



Il. 8. Wizualizacja zasady działania metody z oświetleniem strukturalnym. Źródło: opracowanie własne

będą się deformować bardziej lub mniej (na il. 9 widoczny jest różny stopień deformacji rastrów w zależności od geometrii powierzchni obiektu). Następnie specjalnie opracowane algorytmy analizują zarejestrowane obrazy w celu wyznaczenia geometrii 3D badanej powierzchni. Ogólnie przyjmuje się, że dla każdego piksela detektora o współrzędnych  $i, j$ , na którym obrazowany jest fragment powierzchni badanej oświetlonej przez cyfrowy projektor, wyznaczone są współrzędne  $x, y, z$ . Dodatkowo, dzięki zastosowaniu detektora barwnego metoda pomiaru może być rozszerzona o obrazowanie barwy. W tym przypadku każdy punkt pomiarowy będzie zawierał dodatkowe współrzędne trójchromatyczne barwy (RGB).

Il. 9. Wizualizacja obrazów zarejestrowanych przez detektor w metodzie z oświetleniem strukturalnym:  
 a) dla fragmentu obiektu prawie płaskiego,  
 b) dla fragmentu o strukturach przestrzennych.  
 Źródło: opracowanie własne



Najpowszechniej współcześnie stosowaną techniką z rodziny metod z oświetleniem strukturalnym jest technika projekcji rastrów sinusoidalnych i kodów binarnych (zwanymi kodami Graya). Zastosowanie rastrów sinusoidalnych pozwala na uzyskanie tzw. subpikselowych rozdzielczości pomiaru. Czyli możliwe jest wyznaczenie położenia struktur rzutowanych z projektor, z rozdzielczością poniżej jednego piksela we współrzędnych detektora. W dopracowanych technologicznie rozwiązaniach uzyskuje się rozdzielczość jednej dwudziestej wymiaru piksela w odniesieniu do powierzchni obiektu. Typowe wymiary pola pomiarowego wynoszą od kilkunastu milimetrów do 2 m. Dokładność, jaką pozwalają uzyskać systemy z oświetleniem strukturalnym, wynosi średnio 1/10 000 wielkości pola pomiarowego (przykładowo dla wielkości pola równej 2 m x 2 m dokładność wynosi około 0,2 mm). Systemy wykorzystujące tę metodę nie mają podobnego jak przy triangulacji laserowej ograniczenia, wynikającego z wymiaru plamki. Czyli dla wymiarów pola pomiarowego równego 50 mm x 50 mm, przy poprawnie opracowanym systemie pomiarowym, dokładność pomiaru powinna wynosić około 5 μm. Warto też zwrócić uwagę na to, iż systemy z oświetleniem strukturalnym nie zawierają w swojej konstrukcji mechanicznej elementów ruchomych, dzięki czemu nie zużywają się tak szybko jak systemy triangulacji laserowej.

Technika z oświetleniem strukturalnym jest obecnie powszechnie stosowana do pomiarów geometrii 3D obiektów przestrzennych o wymiarach do 2 m ze względu na prostotę budowy oraz brak elementów ruchomych w konstrukcji tego typu urządzeń. Warunkiem do zastosowania tej metody jest ustalenie, czy powierzchnia obiektu mierzonego jest rozpraszająca, czy też częściowo rozpraszająca światło. Czynnikiem ograniczającym stosowanie tej metody na większą skalę jest konieczność oświetlenia przez cyfrowy projektor całej badanej powierzchni jednocześnie. Obecnie nie są dostępne tak wydajne źródła światła, by umożliwiły pomiary w oświetleniu słonecznym (często jest ono tak silne, że na obrazach zarejestrowanych przez detektor struktura rzutowana jest trudno rozpoznawalna i mało kontrastowa). Ważną zaletą systemów z oświetleniem strukturalnym jest możliwość zmiany wymiarów pola pomiarowego i ponownej kalibracji w terenie, co zwiększa uniwersalność zastosowań dla tego typu systemów.

Zalety techniki z oświetleniem strukturalnym:

- równomierne próbkowanie geometrii 3D badanej powierzchni niezależnie od jej charakterystyki barwnej (oczywiście dotyczy to tylko powierzchni rozpraszających);
- dzięki tej metodzie każdy punkt pomiarowy charakteryzuje się określoną niepewnością pomiaru (zależną od zastosowanego systemu oraz warunków pomiaru);
- możliwe są zmiany wymiaru pola pomiarowego, rozdzielczości próbkowania i co za tym idzie dokładności pomiaru;
- brak ruchomych elementów mechanicznych w konstrukcji urządzenia.

Wady techniki z oświetleniem strukturalnym:

- niska wydajność energetyczna powodująca, że pomiary w oświetleniu słonecznym nie mogą być realizowane.

Przykłady najbardziej popularnych rozwiązań z zastosowaniem techniki z oświetleniem strukturalnym do dokumentacji dziedzictwa kulturowego można znaleźć na stronach: <http://www.aicon3d.com/en/breuckmann-scanner/kunst-kultur.html>; [http://www.3dscanningtechnologies.com/3dscanningPage.php?Scanning\\_Technology\\_-\\_The\\_World\\_of\\_White\\_Light-5/](http://www.3dscanningtechnologies.com/3dscanningPage.php?Scanning_Technology_-_The_World_of_White_Light-5/) (przegląd wybranych rozwiązań); <http://skaner3d.pl/?p=181> (polskie rozwiązanie).

### 2.3. NAJTAŃSZE ROZWIĄZANIA DO SKANOWANIA 3D NA POTRZEBY WIZUALIZACJI

Jednym z najpopularniejszych rozwiązań stosowanych do niskokosztowego skanowania 3D, pozwalającym na uzyskanie geometrii badanej powierzchni, jest kontroler Kinect™ oferowany przez firmę Microsoft. Istnieją też rozwiązania podobne, oferowane przez firmy konkurencyjne, z których najpopularniejsze to Asus Xtion™ (firma Asus). Aparaty te zostały zaprojektowane jako kontrolery do gier komputerowych. Ich podstawowa funkcjonalność to możliwość pomiaru geometrii badanej sceny, polegająca na skanowaniu sylwetki gracza bądź kilku graczy kilkadziesiąt razy (zazwyczaj 30) na sekundę.

Oba rozwiązania charakteryzują się podobną konstrukcją (il. 10) i składają się z kamery cyfrowej, kamery pracującej w podczerwieni i rzutnika stałego rastra w zakresie podczerwonym. Pomiar geometrii 3D odbywa się w zakresie podczerwieni w sposób niezauważalny dla zmysłów człowieka. Rzutowany raster deformuje się na scenie i jest rejestrowany przez kamerę



Il. 10. Zdjęcia kontrolerów: a) Kinect™. Źródło: <http://www.xbox.com/pl-PL/Kinect/GetStarted>, b) Asus Xtion™. Źródło: [http://www.asus.com/pl/Multimedia/Xtion\\_PRO\\_LIVE/](http://www.asus.com/pl/Multimedia/Xtion_PRO_LIVE/)

w podczerwieni. Na tej podstawie wyznaczana jest geometria 3D. Dodatkowo z wynikiem 3D łączy się obraz zarejestrowany normalną kamerą i powstaje mapa RGBZ (czerwony, zielony, niebieski i głębia). Urządzenia te rozszerzają normalny obraz z kamery (RGB) o mapę głębi (Z) reprezentującą odległość danych pikseli od urządzenia.

Kontrolery te – ze względu na swoje główne przeznaczenie (rynek gier komputerowych) – budowane są w sposób minimalizujący koszty. Wiąże się to głównie z niedokładnym i słabo usztywnionym mocowaniem wzajemnym układu rzutującego raster z kamerami, na skutek czego uzyskiwana dokładność jest zmienna i niezadowalająca. Urządzenia te różnią się pomiędzy sobą w odwzorowaniu geometrii 3D nawet o 10 proc. w stosunku do wymiarów pola pomiarowego. Tak duża wartość może w konsekwencji powodować, że obiekt obrazowany w 3D dwoma różnymi urządzeniami raz będzie miał 2 m wysokości, a innym razem 2,2 m. Z tego względu kontrolery te nadają się jedynie do wykonywania odwzorowania o jakości wizualizacji 3D.

Zalety kontrolerów 3D do gier:

- niski koszt urządzenia,
- dostępność wielu darmowych pakietów oprogramowania.

Wady kontrolerów 3D do gier:

- niska dokładność i powtarzalność pomiarów (rzędu 10 proc.),
- niska wydajność energetyczna (brak możliwości realizacji pomiarów przy oświetleniu słonecznym).

Przykłady najbardziej popularnych rozwiązań oprogramowania kontrolerów 3D do gier stosowanych w dokumentacji dziedzictwa kulturowego zamieszczone są na stronach: <http://en.wikipedia.org/wiki/Kinect> (rozwiązania dla Kinect™); [http://www.asus.com/Multimedia/Xtion\\_PRO/](http://www.asus.com/Multimedia/Xtion_PRO/) (biblioteki dla programistów dla Asus Xiton™).

## **2.4. ZESTAWIENIE TECHNIK POMIAROWYCH W ZALEŻNOŚCI OD PARAMETRÓW POWIERZCHNI I OTOCZENIA**

Jak widać w tabeli na stronie obok, głównym ograniczeniem istniejących metod stosowanych w dokumentacji 3D obiektów dziedzictwa kulturowego jest charakter możliwej do obrazowania powierzchni. Obecnie istnieje wiele metod pomiarowych, jednak można je zastosować jedynie do powierzchni, które są rozpraszające lub częściowo rozpraszające i jednocześnie nieprzeźroczyste.

Kolejną cechą istotną z punktu widzenia pomiaru jest zależność uzyskiwanych współrzędnych ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) od warunków zewnętrznych, takich jak stałość i jasność oświetlenia tła. Metody, w szczególności wykorzystujące plamkę lasera (metoda triangulacji laserowej oraz czasu przelotu wiązki), która rozprasza się na powierzchni obiektu, są niezależne od tego czynnika.

Techniki pomiarowe	Rodzaje dopuszczalnych powierzchni	Wymagane warunki pomiaru	Wynik pomiaru	Rozdzielczość i dokładność pomiaru	Obrazowanie barwy powierzchni	Zalecenia do stosowania
<b>Fotogrametria</b> (ang. <i>photogrammetry</i> )	Rozpraszające i nieprzeźroczyste	Stołość oświetlenia sceny podczas rejestracji wszystkich zdjęć	Chmura punktów o różnej gęstości, wyskalowana	Rozdzielczość: do 0,1 mm Dokładność: do 0,05 mm	Dobre, takie jak na zarejestrowanych zdjęciach	Precyzyjna dokumentacja 3D, ale tylko w wybranych punktach
<b>Modele ze zdjęć</b> (ang. <i>Structure from Motion</i> )	Rozpraszające i nieprzeźroczyste	Stołość oświetlenia sceny podczas rejestracji wszystkich zdjęć	Chmura punktów o różnej gęstości, bezwymiarowa	Rozdzielczość: do 0,1 mm Dokładność: w każdym przypadku inna, zależna od samego obiektu	Dobre, takie jak na zarejestrowanych zdjęciach	Wizualizacja obiektu w postaci modelu 3D bez zapewnienia stałej jakości odwzorowania – wizualizacja
<b>Triangulacja laserowa</b> (ang. <i>laser triangulation</i> )	Rozpraszające i nieprzeźroczyste	Brak	Chmura punktów o równej gęstości, wyskalowana	Rozdzielczość: do 0,1 mm Dokładność: do 0,05 mm	Średnie, zależne od zastosowanego detektora barwnego	Precyzyjna dokumentacja 3D obiektów o wymiarach do 2 m
<b>Czas przelotu wiązki</b> (ang. <i>Time of Flight</i> )	Rozpraszające i nieprzeźroczyste	Brak	Chmura punktów o równej gęstości, wyskalowana	Rozdzielczość: do 1 mm Dokładność: do 4 mm	Średnie, zależne od zastosowanego detektora barwnego	Precyzyjna dokumentacja 3D obiektów o wymiarach powyżej 2 m do kilku kilometrów
<b>Oświetlenie strukturalne</b> (ang. <i>structured light</i> )	Rozpraszające i nieprzeźroczyste	Jak najmniej, stałe oświetlenie sceny podczas każdego pomiaru	Chmura punktów o równej gęstości, wyskalowana	Rozdzielczość: do 0,01 mm Dokładność: do 0,005 mm	Średnie/dobre, zależne od zastosowanego detektora barwnego	Precyzyjna dokumentacja 3D obiektów o wymiarach do 2 m
<b>Rozwiązania budżetowe</b> (ang. <i>low-cost scanners</i> )	Rozpraszające i nieprzeźroczyste	Jak najmniej oświetlenie sceny	Chmura punktów o równej gęstości, wyskalowana	Rozdzielczość: do 1 mm Dokładność: zależna od konkretnego urządzenia	Średnie/dobre, zależne od zastosowanego detektora barwnego	Wizualizacja obiektu w postaci modelu 3D bez zapewnienia jakości odwzorowania – wizualizacja

Tab. 1. Zestawienie technik pomiarowych w zależności od parametrów powierzchni i otoczenia. Źródło: opracowanie własne

W pozostałych metodach zmienność warunków oświetlenia wpływa na znaczne pogorszenie dokładności wyników, a w przypadku silnego oświetlenia tła uzyskanie poprawnych wyników może być niemożliwe (np. oświetlenie słoneczne może być na tyle silne w porównaniu do rzutowanych obrazów, że na detektorze będą one niewidoczne).

W przypadku gdy dla tworzonej dokumentacji 3D ważne jest poprawne odwzorowanie barwy powierzchni, należy zapewnić stałe warunki oświetlenia podczas rejestracji wszystkich obrazów pomiarowych. W przeciwnym wypadku powstaną różnice pomiędzy pomiarami. Jeśli różnice występują tylko w jasności sceny, to możliwa jest numeryczna korekcja tego zjawiska. Jeśli jednak zmienia się barwa źródła światła (np. oświetlenie słoneczne zmienia się na skutek zmiany pory dnia lub w pomieszczeniu znajdują się niestabilne źródła światła), korekcja tego zjawiska nie jest możliwa i utworzony model nie może być traktowany jako dokumentacja 3D.

Innym elementem istotnym przy wyborze właściwej metody dokumentacji 3D jest reprezentacja danych pod kątem równomierności próbkowania powierzchni. Metody aktywne (triangulacja laserowa, metoda czasu przelotu wiązki i z oświetleniem strukturalnym) charakteryzują się równomiernym i powtarzalnym próbkowaniem powierzchni. To bardzo istotna cecha zapewniająca stałość parametrów wykonywanej dokumentacji. W metodach pasywnych liczba punktów charakterystycznych i końcowa reprezentacja powierzchni zależą od charakteru samego obiektu i zróżnicowania rozkładu barwy na jego powierzchni. Cecha ta jest niepożądana w procesie dokumentacji 3D ze względu na nieprzewidywalność uzyskanych wyników.

W powyższej tabeli podane są wartości możliwych do uzyskania rozdzielczości próbkowania i dokładności odwzorowania dla poszczególnych punktów pomiarowych. Warto zwrócić uwagę na to, że końcowa rozdzielczość i dokładność w konkretnych rozwiązaniach sprzętowych skanerów 3D może znacząco odbiegać od wartości w tabeli. Ostateczne parametry konkretnych rozwiązań sprzętowych zależą od dodatkowych czynników, takich jak: jakość zastosowanych w aparacie elementów projekcyjnych i detekcyjnych, jakość zastosowanych układów optycznych, procedury kalibracji i pomiaru oraz wielu innych. Aby ocenić konkretne rozwiązanie, należy je zweryfikować na obiekcie o znanej geometrii, poprzez porównanie wyników pomiaru z danymi referencyjnymi.

Ważnym czynnikiem jest zakres możliwych wymiarów pól pomiarowych, rozdzielczości i dokładności poszczególnych rozwiązań. Idealne byłoby posiadanie skanera 3D, który ma możliwość dostosowania parametrów pomiaru do wymagań użytkownika i wymiarów badanego obiektu. W rzeczywistości przy wykonywaniu pomiarów zróżnicowanych typów obiektów należy zaopatrzyć się w kilka uzupełniających się rozwiązań sprzętowych. Warto przemyśleć długofalowo, jaką zmienność parametrów akwizycji należy zapewnić, aby móc zrealizować zakładane zadania dokumentacyjne.

Podsumowując, w zależności od celów realizowanego procesu dokumentacyjnego należy dobrać zarówno metodę pomiaru, jak i jej konkretną realizację sprzętową z uwzględnieniem możliwości przetwarzania wyników.



# III. Dodatkowe kryteria doboru techniki pomiarowej

---

**STOSUJĄC TECHNIKI SKANOWANIA 3D** do obiektów dziedzictwa kulturowego, należy mieć na uwadze dodatkowe czynniki, takie jak:

- ilość energii przekazywanej obiektowi badanemu,
- zakres spektralny promieniowania emitowanego w kierunku obiektu,
- niezbędne procesy przygotowania obiektu do dokumentacji (przemieszczanie obiektu, jego czyszczenie, ewentualnie zabiegi konserwatorskie).

W przypadku skanowania 3D obiektów dziedzictwa kulturowego bardzo istotne są ilość energii dostarczana na jednostkę powierzchni oraz zakres spektralny dostarczanej energii. Należy dążyć do tego, aby w kierunku obiektu emitować jak najmniej energii, zwłaszcza w zakresie spoza pasma widzialnego (400–700 nm), czyli ultrafioletu lub podczerwieni.

Przykładowo w przypadku skanowania szczególnie wrażliwych obiektów (odbitki graficzne, tkanina) należy tak dostosować metodę pomiaru, aby powierzchnia obiektu była oświetlana tylko wtedy, kiedy pomiar jest realizowany. Jeśli przyjmiemy, że w danej sytuacji czas otwarcia migawki detektora jest równy 20 ms, przerwa pomiędzy poszczególnymi zdjęciami wynosi 80 ms, a do całego pomiaru niezbędne jest wykonanie 10 zdjęć, wówczas w przypadku oświetlenia ciągłego naświetlamy powierzchnię z pięciokrotnie większą energią, niż przy zastosowaniu źródła synchronizowanego z detektorem (w tym przypadku źródło oświetla powierzchnię obiektu tylko wtedy, kiedy migawka detektora jest otwarta).

Kolejnym czynnikiem warunkującym wybór techniki pomiarowej jest dostępność obiektu. Niektóre techniki pomiarowe wymagają bardziej stabilnych warunków pomiarowych i umieszczenia systemu pomiarowego w bezpośredniej bliskości obiektu mierzonego. Z tego względu podstawowe informacje, które musimy zgromadzić przed wyborem techniki pomiarowej, dotyczą wielkości obiektu, jego wagi oraz tego, czy może on zostać przemieszczony z miejsca, w którym jest ekspozycyjny (np. do laboratorium pomiarowego), czy też musi być skanowany *in situ*.

## IV. Wybrane przykłady zastosowań

---

### 4.1. PROJEKT „CYARK”

Ambicją twórców tego programu jest stworzenie dokumentacji trójwymiarowej dla 500 obiektów i zespołów światowego dziedzictwa kulturowego. Dotychczas we współpracy z różnymi instytucjami zrealizowano pomiary w ponad 40 miejscach świata.

Strona internetowa projektu: <http://www.cyark.org>

### 4.2. PROJEKT „SCOTTISH TEN”

Pięcioletni projekt realizowany przy wsparciu rządu szkockiego zakłada stworzenie trójwymiarowej dokumentacji dziesięciu obiektów. Kluczem wyboru był związek z przygotowywaną przez UNESCO Listą Światowego Dziedzictwa Kulturowego. Pięć z wybranych miejsc znajduje się na terytorium Szkocji (neolityczne zabytki Orkney, Mur Antonina, Stare i Nowe Miasto w Edynburgu, kompleks przemysłowy w New Lanark, wyspa St. Kilda), pozostałe rozsiane są po świecie (kompleks Rani ki Vav, grobowce dynastii Qing, rzeźby Mount Rashmore, opera w Sydney, dźwig w Nagasaki). Projekt realizowany jest przy współpracy Historic Scotland i Digital Design Studio at The Glasgow School of Art w powiązaniu z projektem „CyArk”. Ze względu na skalę dokumentowanych obiektów najczęściej stosowaną techniką był naziemny skaning laserowy. Wspomagano go jednak zarówno technikami lotniczymi (LIDAR), jak i precyzyjnym skanowaniem z oświetleniem strukturalnym.

Strona internetowa projektu: <http://www.scottishten.org>

### 4.3. PROJEKT „3D-COFORM”

Realizowany w ramach VII Programu Ramowego w okresie od 1 grudnia 2011 do 30 listopada 2012 roku projekt „3D-COFORM Tools and Expertise for 3D Collection Formation” miał na celu przegląd istniejących technik umożliwiających wykonywanie dokumentacji przestrzennych obiektów zabytkowych. Szczególny nacisk położono w nim na opracowanie ścieżki po-

stępowania obejmującej wszystkie fazy procesu digitalizacji – od zebrania danych pomiarowych, poprzez ich przetworzenie, aż do metod wizualizacji efektów prac.

Strona internetowa projektu: <http://www.3d-coform.eu> (na stronie można pobrać, w formie PDF, raport końcowy z realizacji projektu)

#### 4.4. PROJEKT „CULTLAB3D”

Projekt Instytutu Fraunhofera, realizowany przy wsparciu niemieckiego Ministerstwa Ekonomii i Technologii, ma na celu stworzenie zautomatyzowanego systemu do skanowania obiektów muzealnych. Obecnie prototyp stanowiska testowany jest w kilku muzeach niemieckich. Działanie systemu opiera się na pomiarze fotogrametrycznym, który w przyszłości ma zostać wzbogacony o możliwość skanowania z oświetleniem strukturalnym.

Strona internetowa projektu: <http://cultlab3d.eu>

#### 4.5. PROJEKT „MONA LISA”

W roku 2004 zespół kanadyjskich naukowców z NRC (National Research Council of Canada) przeprowadził w Paryżu skanowanie powierzchni arcydzieła Leonarda da Vinci przy użyciu specjalnie skonstruowanego skanera wykorzystującego zasadę triangulacji laserowej. Powierzchnię o wymiarach 79,4 cm x 53,4 cm zeskanowano z rozdzielczością przestrzenną wynoszącą ponad 250 punktów na mm<sup>2</sup> powierzchni (odległość między punktami w chmurze to 60 μm).

Artykuł opisujący efekty projektu: F. Blais, J. Taylor, L. Cournoyer i in., *Ultra high-resolution 3D laser color imaging of paintings: The Mona Lisa by Leonardo da Vinci*, [w:] *Lasers in the Conservation of Artworks*, M. Castillejo i in., London 2008.

# Podsumowanie

---

**PODOBNIENIE JAK W INNYCH** dziedzinach ludzkiej aktywności, również w przypadku dokumentacji obiektów dziedzictwa kulturowego nie istnieje coś takiego jak „najlepsza technika pomiaru trójwymiarowego”. Każda z opisanych w tej publikacji technik ma swoje zalety i wady. Dobre przygotowanie projektu digitalizacyjnego polega na takim dobraniu systemu pomiarowego, aby zakładane w nim wymagania użytkowe można było zrealizować w maksymalnie efektywny sposób. Należy przy tym pamiętać, że z perspektywy dokumentacji obiektów dziedzictwa kulturowego naprawdę cenne są te dane pomiarowe, których będzie można użyć jako punktów odniesienia także w przyszłości. Z tego powodu do obowiązków osób zajmujących się digitalizacją obiektów zabytkowych należy stałe śledzenie rozwoju technik pomiarowych i informowanie, jakie projekty są możliwe do zrealizowania przy obecnym poziomie technologii, a jakie będzie można zrealizować dopiero w przyszłości.

# Słowniczek podstawowych pojęć

---

*Digitalizacja* – zgodnie z definicją encyklopedyczną jest to przetworzenie wartości analogowej w cyfrową; w odniesieniu do zastosowania przy dokumentacji dzieł sztuki digitalizacja oznacza przetworzenie rzeczywistego obiektu w jego wizerunek cyfrowy. Kopia cyfrowa powinna się charakteryzować jakością odwzorowania wynikającą z zastosowanej techniki i urządzeń. (Uwaga: utworzenie modelu 3D przez grafika komputerowego nie jest digitalizacją. Taki proces nazywany jest modelowaniem).

Na potrzeby niniejszego opracowania digitalizację można też rozumieć jako zautomatyzowany proces pomiarowy, pozwalający na uzyskanie danych cyfrowych o stałych i dobrze zdefiniowanych parametrach.

*Digitalizacja 3D, dokumentacja 3D* – przetworzenie rzeczywistego obiektu w jego wizerunek cyfrowy zapisany w postaci trójwymiarowej (najpowszechniejsze zastosowanie to skanowanie 3D, pozwalające na uzyskanie współrzędnych  $[x, y, z]$  powierzchni rzeczywistego obiektu w kartezjańskim układzie współrzędnych).

*Rozdzielczość pomiaru, rozdzielczość próbkowania* – określa średnią odległość między punktami  $(x, y, z)$  próbkującymi powierzchnię wirtualnej reprezentacji obiektu.

*Niepewność pomiaru, dokładność* – niepewność pomiaru określa, jak bardzo wynik pomiaru może się różnić od rzeczywistej wartości mierzonej.

Przykład: Przy pomiarach 3D niepewność pomiaru wyrażana jest w milimetrach jako  $\pm$  wartość [mm], np.  $\pm 0,1$  [mm] oznacza, że uzyskane z danego skanera 3D punkty  $(x, y, z)$  mogą być obciążone błędem 0,1 mm, tzn. że ich rzeczywista lokalizacja może się różnić od rzeczywistej lokalizacji o 0,1 mm w każdej z osi współrzędnych.

*Współrzędne trójchromatyczne* – są to wartości: czerwona, zielona i niebieska (ang. *red, green, blue*), rejestrowane przez matrycę detektora.

# Literatura

---

- Blais F., Taylor J., Cournoyer L. i in., *Ultra-High Resolution Imaging at 50  $\mu\text{m}$  using a Portable XYZ-RGB Color Laser Scanner, International Workshop on Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage*, Ascona 2005.
- Bunsch E., Sitnik R., *W stronę obiektywnej dokumentacji dzieła sztuki – praktyczne wykorzystanie skanerów z oświetleniem strukturalnym*, [w:] *Nowoczesne metody gromadzenia i udostępniania wiedzy o zabytkach*, red. A. Seidel-Grzezińska, K. Stanicka-Brzezicka, Wrocław 2008, s. 157–162.
- Bunsch E., Sitnik R., *Zastosowanie technologii precyzyjnego skanu 3D w prewencyjnej konserwacji dzieł sztuki. Najnowsze możliwości rejestracji procesów starzeniowych*, [w:] *Archaeologica Hereditas*, t. 1, red. Z. Kobyliński, J. Wysocki, Warszawa 2012, s. 197–204.
- Brusco N., Capeleto S., Fedel M. i in., *A system for 3D modeling frescoed historical buildings with multispectral texture information*, "Machine Vision and Applications" 2006, nr 17, s. 373–393.
- Godin G., Beraldin J.A., Taylor J. i in., *Active Optical 3D Imaging for Heritage*, "Computer Graphics in Art History and Archaeology" 2002.
- Modzelewska A., Sitnik R., *Odwzorowanie struktury powierzchni obiektu zabytkowego za pomocą skanu 3D*, [w:] *Nowoczesne metody gromadzenia i udostępniania wiedzy o zabytkach*, red. A. Seidel-Grzezińska, K. Stanicka-Brzezicka, Wrocław 2008, s. 147–156.
- Pavidis G., Koutsoudis A., Arnaoutoglou F. i in., *Methods for 3D digitization of Cultural Heritage*, "Journal of Cultural Heritage" 2007, nr 8, s. 93–98.
- Sitnik R., Bolewicki P., Rutkiewicz J. i in., *Project „Revitalization and digitalization of the seventeenth-century palace complex and garden in Wilanów- phase III” Task “3D digitalization of selected exhibits collection”*, EuroMed2010, Limassol 2010, s. 7–13.

# Spis treści

---

<b>WSTĘP</b> .....	3
<b>I. PROCES DOKUMENTACJI 3D</b> .....	5
1.1. Cele dokumentacji 3D .....	6
1.2. Określenie wymaganych parametrów technicznych metody pomiarowej .....	7
1.3. Proces digitalizacji 3D.....	7
<b>II. PRZEGLĄD TECHNIK POMIAROWYCH</b> .....	10
2.1. Pasywne techniki pomiarowe .....	10
2.1.1. Fotogrametria .....	10
2.1.2. Modele ze zdjęć .....	12
2.2. Aktywne techniki pomiarowe .....	15
2.2.1. Triangulacja laserowa .....	15
2.2.2. Metoda czasu przelotu wiązki .....	17
2.2.3. Metoda z oświetleniem strukturalnym .....	18
2.3. Najtańsze rozwiązania do skanowania 3D na potrzeby wizualizacji .....	21
2.4. Zestawienie technik pomiarowych w zależności od parametrów powierzchni i otoczenia .....	22
<b>III. DODATKOWE KRYTERIA DOBORU TECHNIKI</b> .....	25
<b>IV. WYBRANE PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ</b> .....	26
4.1. Projekt „CyArk” .....	26
4.2. Projekt „Scottish Ten” .....	26
4.3. Projekt „3D-COFORM” .....	26
4.4. Projekt „Cultlab3D” .....	27
4.5. Projekt „Mona Lisa” .....	27
<b>PODSUMOWANIE</b> .....	28
<b>SŁOWNICZEK PODSTAWOWYCH POJĘĆ</b> .....	29
<b>LITERATURA</b> .....	30

**KULTURA+**



**Digitalizacja**

**Ministerstwo  
Kultury  
i Dziedzictwa  
Narodowego.**



NARODOWY  
INSTYTUT MUZEALNICTWA  
I OCHRONY ZBIORÓW

ul. Goraszewska 7, 02-910 Warszawa  
tel. (+48 22) 25 69 600, fax (+48 22) 25 69 650  
e-mail: [biuro@nimos.pl](mailto:biuro@nimos.pl)  
[www.nimos.pl](http://www.nimos.pl)