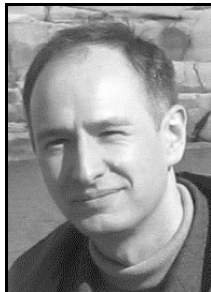


Jacek KĘSIK, Jerzy MONTUSIEWICZ, Kamil ŻYŁA
 INSTYTUT INFORMATYKI, WEiI, POLITECHNIKA LUBELSKA,
 ul. Nadbystrzycka 36 b, 20-618 Lublin

Niskobudżetowe metody skanowania 3D w tworzeniu wirtualnych ekspozycji muzealnych

Dr inż. Jacek KĘSIK

Adiunkt w Instytucie Informatyki Politechniki Lubelskiej, zajmuje się grafiką komputerową, przetwarzaniem obrazu ukierunkowanym na stereowizję, projektowaniem mobilnych aplikacji Web.



e-mail: j.kesik@pollub.pl

Mgr inż. Kamil ŻYŁA

Asystent w Instytucie Informatyki Politechniki Lubelskiej, zajmuje się inżynierią sterowaną modelami, projektowaniem systemów informatycznych oraz zagadnieniami przetwarzania mobilnego.



e-mail: k.zyla@pollub.pl

Dr hab. inż. Jerzy MONTUSIEWICZ

Kierownik Zakładu Programowania i Grafiki Komputerowej w Instytucie Informatyki WEiI. Pracę doktorską z zakresu metod dekompozycji w optymalizacji wielokryterialnej bronił w Politechnice Krakowskiej, a tytuł doktora habilitowanego uzyskał w Politechnice Poznańskiej za pracę prezentującą autorski system analizy wielokryterialnej do wspomagania procesów decyzyjnych.



e-mail: j.montusiewicz@pollub.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono propozycje zastosowania niskobudżetowych metod skanowania 3D do generowania wirtualnych ekspozycji muzealnych. Ekspozycja obejmuje modele eksponatów umieszczone w wizualizacji 3D ich naturalnego otoczenia. Wykorzystano metody bazujące na świetle strukturalnym (nie laserowe), bazujące na łatwo dostępnych sensorach (Microsoft Kinect, projektor kamera cyfrowa) i gotowych rozwiązaniach programistycznych. Metody dobrano pod kątem niskiego skomplikowania procedury skanowania oraz przydatności do realizowania przewidywanych zadań skanowania. Możliwość uzyskania zadowalającego wizualnie rezultatu została sprawdzona eksperymentalnie i oceniona pod kątem możliwości samodzielnego wykorzystania przez placówki muzealne.

Słowa kluczowe: skanowanie 3D, światło strukturalne, obiekty muzealne, wirtualne ekspozycje muzealne.

Low-cost 3D scanning methods as tools for virtual heritage expositions

Abstract

The paper presents proposals for the use of low cost 3D scanning methods to generate virtual museum exhibitions. The exhibition includes models of exhibits placed in the 3D visualization of their natural environment. For the 3D scanning, methods based on structured light (not laser) were used, utilizing easy available sensors (Microsoft Kinect, projector, digital camera) and ready programming solutions. Two main scanning tasks were proposed: scanning of the exhibition environment and scanning of the exhibits themselves. For the first task there was chosen a method 1 which allowed for quick scanning of vast regions by utilization of Microsoft Kinect (Fig. 1.). For the second task there was selected a slower and more accurate method 2, utilizing a standard camera and projector with the aid of dedicated software David Laserscanner (Fig. 2.). The methods were chosen with regard to low complexity of the scanning procedure and the suitability to carry out the expected tasks of scanning (Fig. 3.). The possibility of obtaining a satisfactory result was experimentally verified (Fig. 4.) and evaluated in terms of the possibility of independent use by museums.

Keywords: 3D scanning, structured light, museum exhibits, virtual museum exhibitions.

1. Wstęp

Proces digitalizacji zbiorów polskich muzeów realizowany jest już od wielu lat. Dotyczy on różnych obiektów, np.: zbiorów tekstowych, prac malarskich, trójwymiarowych obiektów wystawienniczych lub obiektów architektonicznych. Głównym celem digitalizacji jest nie tylko archiwizacja zebranych zbiorów, ale również ich wirtualne udostępnienie społeczeństwu. Proces cyfryzacji zbiorów, z jednej strony, umożliwia zachowanie informacji o istniejących zasobach muzealnych, z drugiej zaś może przyczynić się do zwiększenia zainteresowania konkretnymi placówkami muzealnymi dzięki czemu może nastąpić wzrost liczby osób odwiedzających te muzea oraz miasta, w których się one znajdują.

Obecne możliwości grafiki 3D a także dostęp do zaawansowanych technologii WWW pozwalają postąpić krok dalej w stosunku do samej prezentacji modelu 3D obiektu muzealnego. Modele te można umieścić w wirtualnej rekonstrukcji ich naturalnego otoczenia dając możliwość oglądania eksponatów w sposób odpowiadający rzeczywistości zwiedzaniu muzeum.

Dostępne publikacje, obejmujące kompleksowo problem skanowania obiektów muzealnych skupiają się raczej na autorskich rozwiązaniach wykorzystujących profesjonalne skanery i specjalne kioski prezentacyjne [1]. Nie są one jednak powszechnie dostępne do realizacji przez placówki muzealne. Dzieje się tak między innymi z powodu trudności w pozyskaniu dobrej jakości modelu 3D eksponatu. Rozwiązania komercyjne, wykorzystujące profesjonalne urządzenia są, z racji bardzo wysokich kosztów, dostępne wyłącznie dla renomowanych placówek, które mogą sobie pozwolić na wydatki rzędu kilkudziesięciu tysięcy euro na zakup sprzętu lub płacenie również nie małych kwot za usługi skanowania eksponatów.

Z problematyką samej organizacji procesu digitalizacji można się zapoznać w pracy Kuśmidrowicz-Król [9]. Istotne jest w tym tekście podkreślenie, że aspekty techniczne procesu cyfryzacji wymagają nie tylko specjalistycznego oprzyrządowania, ale również zespołu ludzi dobrze przygotowanych do ich obsługi. Znaczącym jest również stwierdzenie „...decyzja nieinwestowania w infrastrukturę techniczną nie zwalnia z konieczności dysponowania kadrą kompetentną w prowadzeniu i nadzorowaniu prac digitalizacyjnych. Zlecenie podmiotom zewnętrznym działań związanych z digitalizacją własnej kolekcji wymaga szerokiej współpracy ze strony muzeum...”. Ta problematyka była również poruszana w pracach Klaka [6] i Kłosa [7]. Praktyczne aspekty procesu digitalizacji zostały opisane przez Bunscha i Sitnika [2].

Wynika z tego, że niezależnie od wielkości przeznaczonych funduszy oraz wybranej metody konieczne jest aby placówka muzealna posiadała personel zaznajomiony z tematyką skanowania 3D

W niniejszej pracy autorzy starają się odpowiedzieć na pytanie czy wykorzystując ogólnodostępne oprogramowanie oraz niedrogi urządzenie skanujące, możliwe jest uzyskanie zadowalającej

wizualnie prezentacji eksponatów i ich otoczenia oraz czy procedury takiego skanowania są na tyle proste aby mogli nim się zająć odpowiednio przeszkoleni pracownicy placówek muzealnych.

Wzięto pod uwagę rozwiązania bazujące na wykorzystaniu oświetlenia strukturalnego oraz kamery. Wykorzystano zestaw projektor + kamera oraz zintegrowane urządzenie – sensor Kinect. We wszystkich omawianych przypadkach ceny peryferiów skanujących mieszczą się w granicach 1000 zł, co jest ułamkiem ceny profesjonalnego skanera. Nie bez znaczenia jest również dostępność oprogramowania dedykowanego dla tego typu rozwiązań w cenach na tym samym poziomie.

W przypadku Kinecta wykorzystano bezpłatną aplikację Scenect oraz półkomercyjną aplikację ReconstructMe, do skanowania z wykorzystaniem projektora i kamery posłużono się komercyjnym programem David Lasercanner, o cenie nie przekraczającej 1500zł. Zachowano więc wymóg niskiego kosztu stworzenia stanowiska skanującego.

2. Pozyskiwanie skanu 3D ekspozycji

Skanowanie w jednym przebiegu obiektów wraz z ich otoczeniem ma kilka poważnych wad. Po pierwsze oprogramowanie skanujące nie potrafi automatycznie wydzielać obiektów jako osobne modele. Cała ekspozycja musiałaby więc być zapisana jako jeden obiekt. Proces podziału musiałby być wykonany w późniejszym etapie przez eksperta. Po drugie oczekiwany stopień złożoności modeli obiektów jest zdecydowanie większy niż ten wymagany dla otoczenia. Skanowanie całości wymagałoby albo rezygnacji z lepszej jakości wyniku albo wykonywania pracochłonnej procedury dokładnego skanowania dla całego otoczenia. Dodatkowo dokładne skanowanie może wymagać umieszczenia obiektu w wielu pozycjach w stosunku do skanera. Przy wielu kolejno przemieszczanych obiektach utrzymanie takiego samego układu sceny byłoby kłopotliwe do realizacji.

Zaproponowano więc dwuetapową realizację całościowego skanowania ekspozycji: W pierwszym etapie skanowane jest otoczenie (sala ekspozycyjna) z wykorzystaniem szybszych, mniej dokładnych technik bazujących na skanerze Kinect. Usunięcie na czas skanowania eksponatów pozwala na łatwiejsze operowanie sensorem oraz uzyskanie pełniejszego obrazu otoczenia, nie zasłanianego przez eksponaty. W drugim etapie skanowane są pojedynczo poszczególne eksponaty z wykorzystaniem dokładniejszej, i bardziej czasochłonnej metody wykorzystującej projektor i oprogramowanie David Lasercanner. Możliwość skanowania obiektu poza jego miejscem ekspozycji pozwala na stworzenie optymalnych dla tej metody warunków oświetleniowych.

Niezależnie od wykorzystywanej technologii i sprzętu, w procesie skanowania obiektu 3D można wyróżnić pewne etapy. Są to:

- Pozyskanie chmury punktów 3D odpowiadających powierzchni skanowanego obiektu. W zależności od typu skanowania (ciągłe / stałopozycyjne) pojedynczy skan może odwzorowywać całą lub tylko pewien obszar powierzchni obiektu. Efektem tego etapu może więc być kilka skanów obejmujących różne fragmenty powierzchni obiektu. Na tym etapie wykonywane jest również pozyskanie tekstur odpowiadających położeniom zarejestrowanych punktów 3D.
- Dopasowywanie skanów. Proces ten jest potrzebny w przypadku kilku skanów obiektu, gdy początkowe położenie urządzenia skanującego w stosunku do obiektu jest różne. Na tym etapie usuwa się również niepotrzebne i powtarzające się fragmenty zeskanowanego otoczenia.
- Wygenerowanie siatki trójkątów na podstawie chmury punktów i nałożenie tekstur. Algorytm generowania siatki musi sobie poradzić również z wypełnieniem ubytków powstałych w skutek niepełnego skanowania.
- Postprocessing. Poprawianie niedociągnięć skanowania. Dodawanie tekstur o wyższych rozdzielczościach. Generowanie powierzchni nieskanowalnych (powierzchnie przezroczyste i lustrzane).

Kończymy obiektem jest więc model 3D składający się z siatki trójkątów oraz dopasowanej do niego tekstury. W zastosowaniach prezentacyjnych dąży się do minimalizacji gęstości siatki trójkątów obiektu w celu zmniejszenia obciążenia dla komputera przy wyświetlaniu obiektu w czasie rzeczywistym. Właściwy efekt wizualny uzyskuje się dzięki stosowaniu odpowiedniego układu tekstur, nadających obiektowi wrażenie znacznie większej szczegółowości niż rzeczywista.

Obecnym standardem przetwarzania i prezentacji grafiki 3D w Internecie jest WebGL, będący implementacją standardu OpenGL ES [3], przeznaczonego dla systemów wbudowanych np. urządzeń mobilnych. Cechą tego rozwiązania oprócz udostępniania standardowych metod przetwarzania otekstrowanych obiektów 3D, jest możliwość niezauważalnego przechodzenia między renderowaniem programowym i sprzętowym, w miarę dostępności danego typu akceleracji w urządzeniu. Zwiększa to znacząco dostępność usługi renderowania dla danego urządzenia a więc i grono potencjalnych odbiorców internetowej aplikacji 3D.

Zastosowanie podziału na dokładne modele eksponatów i mniej szczegółowo opisane otoczenie jest więc tym bardziej zasadne, gdyż taki model umożliwia przygotowanie interaktywnych animacji ekspozycji tak aby mogło sobie poradzić z jej płynnym wyświetlaniem urządzenie o relatywnie słabych parametrach obliczeniowych. Wynika z tego, że niezależnie od stopnia gęstości skanu początkowego obiektu, dla celów prezentacji w Internecie będziemy dążyć do uzyskania możliwie prostego modelu siatki 3D dla otoczenia. Model otoczenia można uzyskać bazując na skanie o znacznie mniejszej szczegółowości.

3. Wykorzystywane metody skanowania 3D

Analizowane metody skanowania różnią się nie tylko wykorzystywanymi peryferiami, ale również sposobem przeprowadzania samego procesu skanowania.

Metoda 1 – Skanowanie urządzeniem Kinect

Metodę tą wykorzystano do skanowania otoczenia eksponatów. Zastosowano dwa rodzaje ogólnodostępnego oprogramowania wykorzystującego sensor Kinect: Scenect firmy FARO [5] oraz ReconstructMe firmy Profactor [10].

Niezależnie od wykorzystywanego oprogramowania procedura skanowania polega na przemieszczaniu czujnika Kinect wzdłuż powierzchni otoczenia, w taki sposób aby algorytm mógł uchwycić i śledzić punkty charakterystyczne obszaru skanowania. Na bazie zmian położenia tych punktów wyznaczana jest trajektoria poruszania czujnikiem [8]. Czujnik wyposażony jest również w promiennik podczerwieni dokonujący projekcji punktowych tworzących siatkę o rozdzielczości 300x200. Kamera pracująca w podczerwieni pobiera obraz odbić tych promieni. Z różnic ich wzajemnego położenia jest odczytywana odległość dla poszczególnych punktów obrazu o rozdzielczości 640x480 pikseli (rys. 1).

Zastosowanie promiennika podczerwieni uodparnia urządzenie na warunki oświetleniowe danego pomieszczenia, uniemożliwiając jednocześnie skanowanie w terenie otwartym w warunkach silnego nasłonecznienia. Zakres skanowania zawiera się w przedziale od 0,5 do 6 m.

Pewną wadą tej metody[5], jak również innych metod opartych na świetle strukturalnym jest ignorowanie powierzchni przezroczystych, lustrzanych oraz obszarów o wysokim połysku. Efekt skanowania będzie więc zawierał ubytki konieczne do uzupełnienia w późniejszym etapie przetwarzania. Cecha ignorowania przezroczystych powierzchni jest natomiast przydatna, gdyż skanowanie nie „zatrzymuje się” na powierzchni szyby osłaniającej eksponaty.



Rys. 1. Chmura punktów powierzchni otoczenia uzyskana sensorem Kinect
Fig. 1. Point cloud acquired by Kinect

Zastosowana w metodzie 1 technika przemieszczania skanera pozwala teoretycznie na wykonanie pełnego skanu obiektu w jednym przebiegu. W praktyce skanowanie wygodniej jest podzielić na etapy ze względu na uciążliwość poruszania się ze skanerem połączonym kablem z komputerem i zasilaczem. Uzyskane skany częściowe mogą być połączone na obecnym etapie z wykorzystaniem narzędzi udostępnianych przez oprogramowanie Scenect. Pozwalają one m. in. na sprawne oznaczanie odpowiadających sobie płaskich powierzchni (np. ściany pomieszczenia), zdecydowanie trudniejszym zadaniem dla operatora oprogramowania jest dopasowanie nieregularnych kształtów.

Metoda 2 – Skanowanie z wykorzystaniem projektora multimedialnego

W drugiej z wykorzystywanych procedur skanowania, układ skanowania pozostaje nieruchomy podczas całego procesu skanowania. Wykonywane są kolejne skany nieruchomego obiektu w różnych położeniach (kąt obrotu względem osi Y) w stosunku do układu skanowania.

Sam układ składa się z dwóch urządzeń: projektora multimedialnego i kamery. W teście wykorzystano standardowy projektor FullHD oraz kamerę o rozdzielczości rzeczywistej 2 milionów pikseli. Ze względu na to, że elementy układu skanowania mogą mieć różne ustawienia optyki (zbliżenie, ostrość) oraz nieustaloną odległość obiektu od układu, konieczne jest skalibrowanie układu przed skanowaniem. Proces kalibracji polegający na ustawieniu w odpowiedniej odległości planszy testowych i dostrojeniu projektora oraz kamery, nie wymaga zaawansowanych umiejętności od operatora.

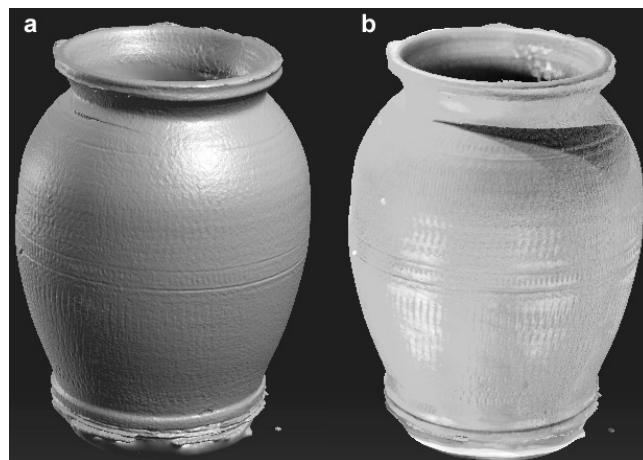
Układ ze względu na swoją stacjonarność i ograniczony obszar skanowania, nadaje się do skanowania obiektów o stosunkowo niewielkich gabarytach, których położenie względem skanera można łatwo zmieniać. Jednocześnie, według zapewnień twórców oprogramowania, układ pozwala uzyskać dokładność pomiędzy 0,1% a 0,5% rozmiarów obiektu (dla obiektu o gabarytach rzędu 20 cm pozwalało by to na zmapowanie szczegółów powierzchni o rozmiarach 0,2 mm) [4]. Rzeczywista dokładność jest jednak zależna od wykorzystywanego zestawu kamera-projektor.

Istnieje techniczna możliwość zmontowania statywu utrzymującego projektor i kamerę w stałym wzajemnym położeniu. Pozwalałoby to na przemieszczanie skanera w koło obiektu o większych gabarytach bez konieczności każdorazowej kalibracji. Proces pojedynczego skanowania trwa jednak od kilku do kilkunastu sekund, w czasie którego skaner nie może zmieniać pozycji względem obiektu. Fakt ten oraz ciężar układu skanującego uniemożliwiają prowadzenie skanowania „z wolnej ręki”.



Rys. 2. Skan fragmentu obiektu, złożenie kilku skanów cząstkowych
Fig. 2. Scan of a fragment of the object, combination of partial scans

Końcowy efekt skanowania będzie złożeniem skanów cząstkowych, kolejno dopasowywanych do siebie (rys. 2). Ewentualne luki zostaną uzupełnione na etapie generowania siatki modelu 3D. Oprogramowanie udostępnia algorytm generacji siatki obiektu, z możliwością regulacji stopnia szczegółowości. Uzyskany efekt, nawet przy niskim stopniu szczegółowości, jest zdaniem autorów wystarczający do wykorzystania w prezentacji 3D (rys. 3a).



Rys. 3. Model obiektu wygenerowany na podstawie skanu. a) bez tekstury, b) z teksturą

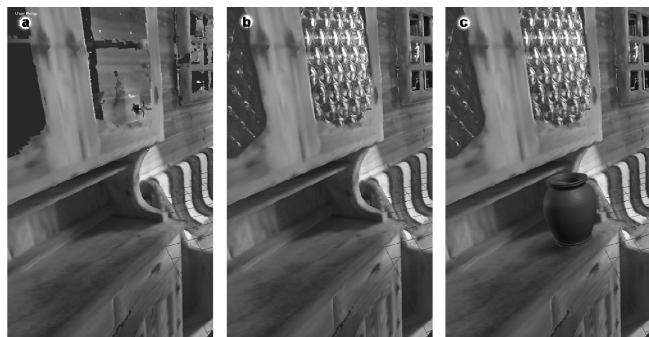
Fig. 3. Object model, generated basing on the scan data. a) without texture, b) with texture

Oprogramowanie zapewnia również możliwość pokrycia modelu teksturą pozyskaną w trakcie skanowania. Pozostawia ona jednak wiele do życzenia, głównie ze względu na występowanie cieni powstałych w skutek oświetlenia obiektu silnym światłem kierunkowym, jakim jest lampa projektora (rys. 3b). Pozyskana tekstura nadaje się bardziej jako obraz referencyjny do dopasowania tekstury o lepszej jakości.

4. Generacja modelu sali ekspozycyjnej

Bazując na metodach opisanych w rozdziale 3 można pokusić się o uzyskanie modelu sali ekspozycyjnej z eksponatami, jak to założono w rozdziale 1. Wymaga to przeprowadzenia procedury przetworzenia uzyskanych skanów w model pomieszczenia i modele eksponatów. Procedura taka składa się z trzech głównych etapów:

Pierwszym etapem jest wygenerowanie modelu pomieszczenia na podstawie skanów metodą 1. Model taki będzie zawierał luki w miejscach występowania powierzchni przezroczystych, lustrzanych i silnie połyskujących (rys. 4a).



Rys. 4. Kolejne etapy generowania modelu ekspozycji. a) surowy model sali, b) model sali z uzupełnionymi ubytkami, c) sala z rozmieszczonymi modelami eksponatów

Fig. 4. Stages of generation of the virtual exposition. a) raw model of the exposition hall, b) hall model with filled gaps, c) hall model with added exhibits

Kolejny etap wymaga wykorzystania tekstur uzyskanych za pomocą fotografii 2D obiektów, do uzupełnienia braków. Etap ten wymaga wykorzystania odpowiedniego oprogramowania edycyjnego (np. Blender) oraz posiadania pewnych umiejętności edycji obiektów 3D. Może on być realizowany przez zewnętrznego usługodawcę na podstawie uzyskanych przez pracowników placówki muzealnej danych źródłowych. Nie wdaje się koniecznym aby placówka muzealna posiadała odpowiednie narzędzia i personel wyszkolony w tej dziedzinie. Przykład modelu pomieszczenia z uzupełnionymi brakami przedstawiono na rys. 4b.

Trzeci etap to wygenerowanie na podstawie efektów uzyskanych metodą 2 modeli eksponatów i rozmieszczenie ich w odpowiednich miejscach modelu sali ekspozycyjnej. Etap ten, w zależności od stopnia skomplikowania wykorzystywanego oprogramowania może być wykonywany przez personel muzeum. Daje to potencjalną zaletę łatwej zmiany wirtualnej ekspozycji w miarę potrzeb placówki. Przykład umieszczenia eksponatu w przestrzeni wirtualnej Sali ekspozycyjnej przedstawiono na rys. 4c.

W efekcie uzyskano wizualizację sali ekspozycyjnej, gdzie dla widocznego fragmentu model ściany z meblami; o wymiarach 3,5 na 2 m; został wygenerowany za pomocą siatki o gęstości rzędu 300 tys. trójkątów. Umieszczony w widoku model dzbanka o wysokości 17 i średnicy 12 cm został wygenerowany za pomocą siatki o gęstości rzędu 350 tys trójkątów.

5. Podsumowanie

Omawiane metody są zdaniem autorów wystarczające do pozyskiwania skanów pomieszczeń i obiektów muzealnych, przeznaczonych do celów wytwarzania wirtualnych ekspozycji prezentowanych poprzez Internet.

Pozyskiwanie skanów i tekstur omawianymi metodami do celów wygenerowania modelu 3D obiektu muzealnego wymaga nabycia pewniej wprawy jednak może być z powodzeniem realizowane przez osobę nie posiadającą zaawansowanej wiedzy technicznej w temacie grafiki 3D. Wstępne modele mogłyby więc przygotowywać pracownik placówki muzealnej. Nieco bardziej zawilą sprawą byłaby dalsza obróbka (postprocessing) otrzymanych skanów w celu uzyskania optymalnych i dobrze oteksturowanych modeli 3D. Tym aspektem musiałby zająć się profesjonalista, nie koniecznie jednak specjalizujący się w skanowaniu 3D, co może znacząco wpłynąć na koszty.

Omawiane rozwiązania uzupełniają się umożliwiając realizację zadań obrazowania 3D obiektów muzealnych jak również otoczenia, w jakim są prezentowane (np. w celu uzyskania wirtualnego odwzorowania historycznego pomieszczenia z umieszczonymi w nim eksponatami). W każdym przypadku istnieje konieczność zakupu tylko jednego elementu dedykowanego dla celów skanowania 3D, sensora Kinect lub oprogramowania David. Pozostałe elementy są bezpłatne lub można je uznać za standardowe wyposażenie. Mimo prostoty obu zestawów urządzenie-program umożliwiają one uzyskanie efektów dających zadowalające wrażenie wizualne. Omawiane metody zostały wybrane do realizacji współpracy z Muzeum Lubelskim w Lublinie w zakresie tworzenia wirtualnych ekspozycji i realizacji wirtualnych rekonstrukcji obiektów.

Zebrane dotąd doświadczenia potwierdzają, że proces skanowania obiektów muzealnych jest wieloetapowy i wymaga działań, które może wykonać tylko osoba posiadająca przynajmniej podstawowe kwalifikacje w tym (np. dobór metody skanowania do rozmiaru obiektu). Ta sytuacja wpisuje się w uwagę Kuśmidrowicz-Król [9], że instytucje muzealne powinny dysponować kadrami kompetentną w prowadzeniu i nadzorowaniu prac digitalizacyjnych. Dostępność opisywanych w artykule metod skanowania obiektów muzealnych ułatwia zdobycie wstępnego doświadczenia potrzebnego osobom pracującym przy digitalizacji zbiorów a opisywany w artykule eksperyment potwierdza możliwość uzyskania oczekiwanych efektów – wirtualnej ekspozycji zbiorów muzeum

Takie rozwiązanie jest szczególnie dedykowane do mniejszych muzeów, których budżety nie będą nigdy na tyle duże, aby pokuścić się o wykonanie profesjonalnej wirtualnej ekspozycji.

6. Literatura

- [1] Bruno F., et al.: From 3D reconstruction to virtual reality: A complete methodology for digital archaeological exhibition, *Journal of Cultural Heritage* 11 (2010).
- [2] Bunsch E., Sitnik R.: Proces digitalizacji 3D – od założeń do dokumentacji cyfrowej, *Muzealnictwo* 52, Warszawa 2011, ss. 49-54.
- [3] Danchilla B.: *Beginning WebGL for HTML5*, Apress 2012.
- [4] DAVID Vision Systems, DAVID SLS-1 Getting Started Guide Version 3.9, http://downloads.david-3d.com/SLS-1/Kurzanleitung_EN_3.9_2013-10-02.pdf, 2013.
- [5] FARO Technologies: SCENECT 5.2 MANUAL, https://faro.blob.core.windows.net/sitefinity/3d-app-center-downloads/e1073_scenect_5-2_manual_en.pdf, 2013.
- [6] Klak P.: Praktyka digitalizacji zabytków i muzealiów, *Muzealnictwo* 52, Warszawa 2011, ss. 55-61.
- [7] Klos M., Nowacka A.: Dobre praktyki digitalizacji na podstawie doświadczeń międzymuzealnej grupy ds. digitalizacji DIGIMUZ, *Muzealnictwo* 52, Warszawa 2011, ss. 62-73.
- [8] Kopniak P.: Rejestracja ruchu za pomocą urządzenia Microsoft Kinect., *Pomiary Automatyka Kontrola VOL. 58*, Wydawnictwo PAK, Warszawa, Listopad 2012 (ISSN 0032-4140, INDEKS 36958).
- [9] Kuśmidrowicz-Król A.: Standardy, procedury i inne wyzwania – prace zespołu ekspertów d. digitalizacji muzealiów NIMOZ, *Muzealnictwo* 52, Warszawa 2011, ss. 30-37.
- [10] Profactor, Strona domowa oprogramowania ReconstructME, <http://reconstructme.net/reconstructme-ui/>, dostęp 05,2014.

otrzymano / received: 04.05.2014

przyjęto do druku / accepted: 01.07.2014

artykuł recenzowany / revised paper