

SKANOWANIE PUKADA DO

Niemal sześć lat temu na konferencji REMO 2000 w Szklarskiej Porębie¹ wygłosiłem wykład inauguracyjny na temat inwentaryzacji komputerowej dla potrzeb konserwacji zabytków. Zwróciłem wówczas uwagę na zastosowanie skaningu laserowego 3D. Była to metoda stosunkowo nowa, bo stabilne rozwiązania aparaturowe pojawiły się na rynku komercyjnym zaledwie dwa lata wcześniej.

JACEK KOŚCIUK

Do dziś z satysfakcją mogę zakomunikować, że na Wydziale Architektury Politechniki Wrocławskiej tworzymy dwie ważne jednostki. Jedną jest Laboratorium Skanowania i Modelowania 3D, organizowane przy Instytucie Historii Architektury, Sztuki i Techniki, finansowane ze środków unijnych w ramach SPO *Wzrost Konkurencyjności Przemysłu*. Jest ono wyposażone w sprzęt najnowszej generacji i będzie świadczyć wysoko wyspecjalizowane usługi inwentaryzacyjne. Druga jednostka to Centrum Dydaktyczne Skanowania 3D HDS powstające dzięki umowie zawartej pomiędzy Politechniką Wrocławską i firmą Leica Geosystems. Centrum posłuży do włączenia technologii skanowania laserowego do oferty dydaktycznej naszej uczelni. Znaczenie takiej jednostki naukowo-badawczej zostało dostrzeżone przez władze Wrocławia, które zamierzają dofinansować tę inicjatywę. W obu placówkach zostanie zainstalowane tak-

że oprogramowanie firmy Bentley Systems z powodzeniem wykorzystywane w dydaktyce na specjalności Ochrona Zabytków: MicroStation, Architecture, Structural, Descartes oraz CloudWorx służący do obróbki danych uzyskanych w procesie skanowania.

• BIM ZAMIAST CAD

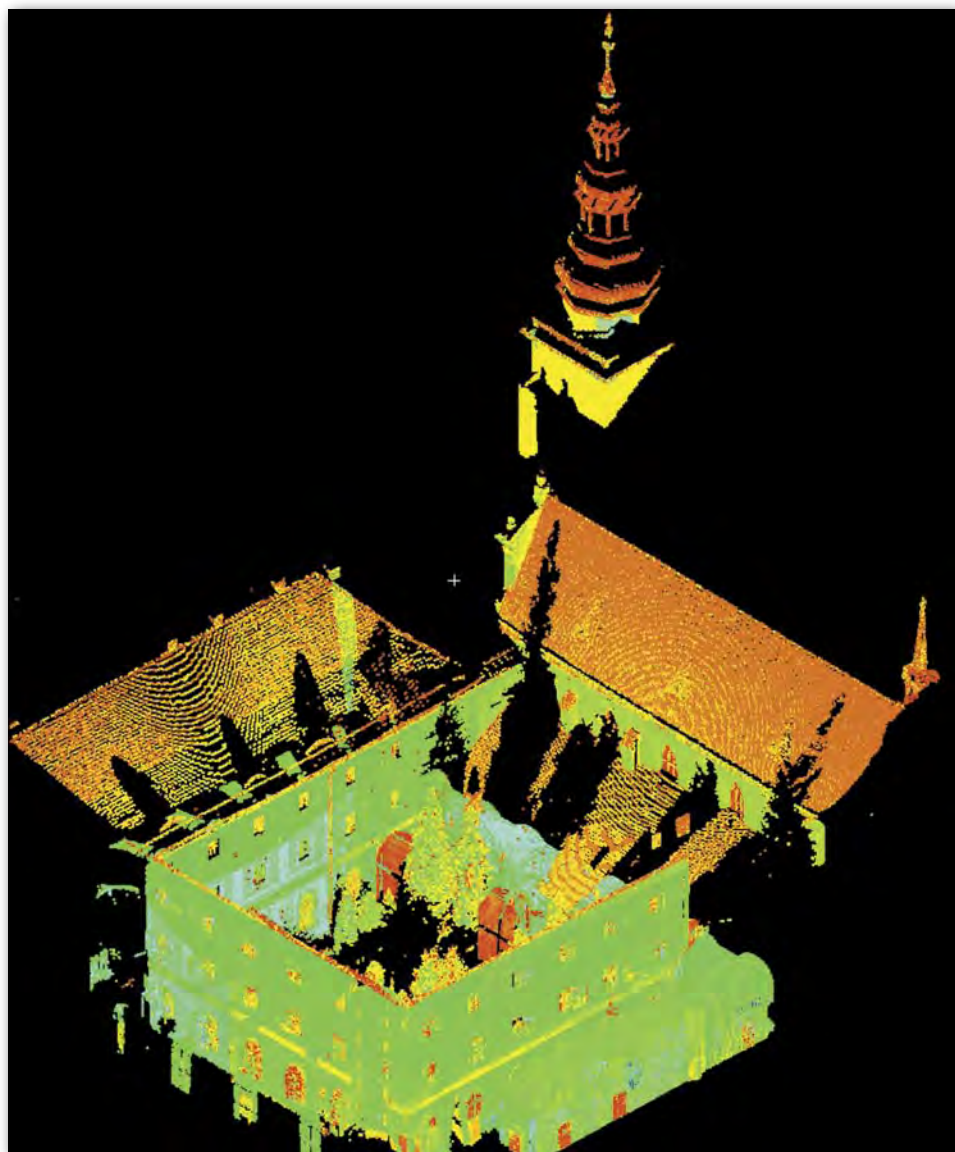
Dotychczasowy rozwój skanowania 3D wydaje się być w dużej mierze stymulowany zmianami zachodzącymi w metodach projektowania. Obserwuje się coraz powszechniejsze odchodzenie od dokumentacji płaskiej (2D), oferującej w warstwie rysunkowej jedynie prostą informację graficzną, do dokumentacji przestrzennej 3D (a nawet 4D). Ta ostatnia nie tylko zawiera graficzną informację o geometrii projektowanych/analizowanych obiektów, ale coraz częściej łączy ją z informacją bazodanową. CAD, czyli projektowanie wspomagane komputerowo, wypierane jest przez BIM (*Building Information Modeling*) – modelowanie informacji budowlanej. Ten trend dotyczy zarówno procesu inwe-

stycyjnego, jak i modernizacji, remontów i badań obiektów już istniejących. Wąskim gardłem w wykorzystaniu metod 3D w projektowaniu, dokumentacji lub analizach jest proces inwentaryzacji. Skanowanie, a szczególnie skanowanie o wysokiej gęstości (HDS), jest obecnie najbardziej technologicznie zaawansowanym narzędziem pozwalającym na szybkie i precyzyjne pozyskanie spójnych danych przestrzennych.

• KILKA SŁÓW O SAMYM SKANOWANIU

Skanery 3D, omiatając otaczającą przestrzeń wiązką laserową, rejestrują współrzędne x, y, z wszystkich punktów, od których odbił się promień lasera (rys. 1). W zależności od modelu i stosowanej technologii użyteczny zasięg interesujących nas skanerów wynosi ok. 300 metrów, a maksymalna gęstość pokrycia obiektu punktami pomiarowymi dochodzi do 1,2 mm. Dokładność modelu zeskanowanej powierzchni mieści się zazwyczaj w granicach 1-2 mm. Proces zbierania danych z punktu pomiarowego trwa od

ANIE 3D DRZWI



Rys. 1. Zespół klasztorny w Henrykowie. Skanowanie wirydarza wraz z obejściem.
Źródło: Materiały Instytutu Historii Architektury, Sztuki i Techniki, WA, PWr.

ZALETY METODY SKANOWANIA LASEROWEGO

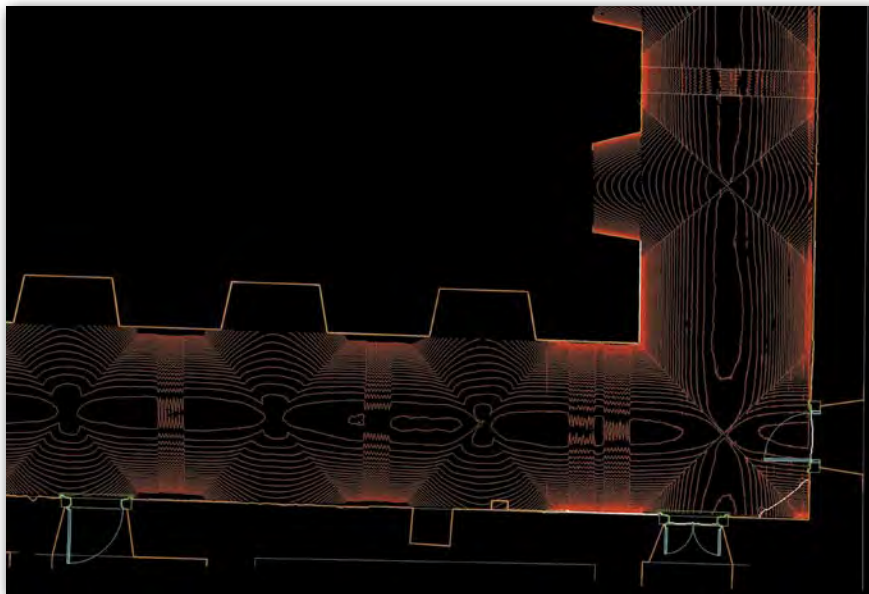
- Skrócenie czasu pomiaru z pojedynczego stanowiska do kilkunastu lub kilkudziesięciu minut (pozwala to np. na pomiary obiektów pracujących w ruchu ciągłym bez konieczności wstrzymywania procesów technologicznych).
- Łatwa dostępność do wszystkich punktów pomiarowych bez konieczności budowania rusztowań, korzystania z podnośników itp.
- Ograniczenie czasu przebywania ekipy pomiarowej na terenie obiektu.
- Zebranie kompletnych, a nawet nadmiarowych danych, co eliminuje konieczność powtórzenia pomiarów w przypadku np. przeoczenia punktów.
- Duża dokładność danych i ich wiarygodność.
- Skrócenie (z reguły czterokrotne) czasu potrzebnego na wykonanie inwentaryzacji obiektu.
- Obniżenie ceny za wykonanie dokumentacji inwentaryzacyjnej.

kilkunastu minut do kilku godzin. Równoległe instrument może wykonywać serię cyfrowych zdjęć, które służą np. jako źródło informacji o kolorze obiektu w punkcie odbicia promienia laserowego. W efekcie otrzymujemy chmurę punktów, w której każdy punkt posiada znane nam wartości x , y , z oraz RGB (rys. 2).

Proces obróbki danych odbywa się w pracowni komputerowej. Dane ze stanowisk pomiarowych są scalane do wspólnej bazy punktów pomiarowych, a następnie analizowane przez specjalistyczne oprogramowanie. Wśród licznych jego funkcji wymienić należy au-



Rys. 2. Zespół klasztorny w Henrykowie. Skanowanie obejścia wirydarza. Chmura punktów powleczone informacją o wartościach RGB. Źródło: Materiały Instytutu Historii Architektury, Sztuki i Techniki, WA, PWr.



Rys. 3. Zespół klasztorny w Henrykowie. Skanowanie obejścia wirydarza. Izolinie sklepień. Źródło: Materiały Instytutu Historii Architektury, Sztuki i Techniki, WA, PWr.

tomatyczne wpasowywanie obiektów wektorowych w dane z chmury punktów pomiarowych. I tak, izolując jej fragmenty, możemy zbudować płaszczyznę lub powierzchnię, która z zadaną dokładnością wpasuje się w punkty pomiarowe. Wyizolowane punkty chmury mogą być automatycznie przekształcane zarówno w proste, jak i skomplikowane obiekty wektorowe (np.: rury, kolana, redukcje, złączki, wszelkie kształtowniki walcowane). Dobór elementu następuje przy tym automatycznie na podstawie danych zawartych w bibliotece programu. W efekcie otrzymujemy precyzyjny

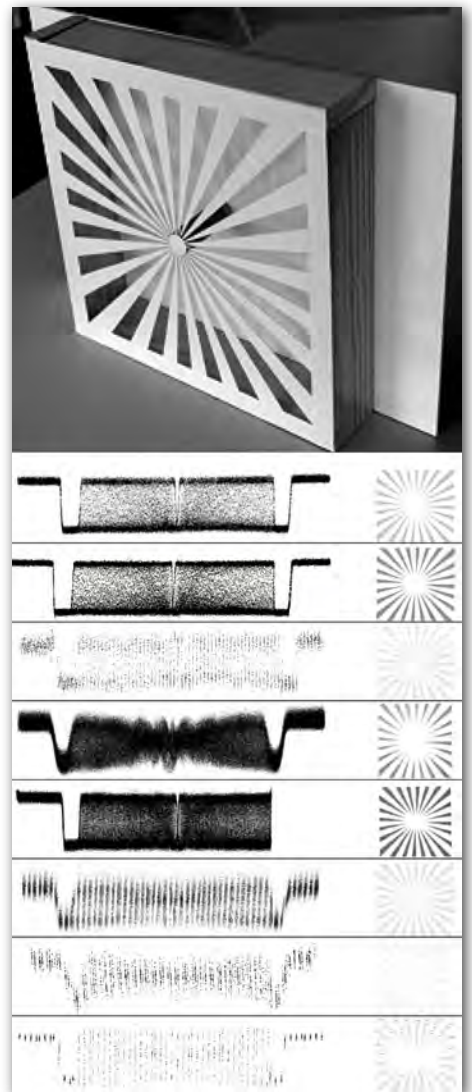
komputerowy model 3D inwentaryzowanego obiektu, który z powodzeniem może posłużyć jako materiał wyjściowy do projektowania, wykonywania analiz wytrzymałościowych itp. Zakres zastosowania takich modeli jest ograniczony tylko naszą inwencją.

Oczywiście możliwe jest też wykonanie dokumentacji płaskiej, rzutów, przekrojów lub elewacji wykonanych w dowolnej skali (rys. 3). Dodatkowo można je „pokryć” informacją uzyskaną ze zdjęć cyfrowych. W rezultacie otrzymamy dokumentację typu fotogrametrycznego – ortofoto.

● PARAMETRY SKANERÓW 3D

Z roku na rok oferowane skanery 3D mają coraz bardziej wyśrubowane parametry². Do najbardziej istotnych z naszego punktu widzenia zaliczyć można:

● **Zasięg skanowania** – w przypadku laserów fazowych ograniczony jest barierą nieoznaczoności związaną z długością fali lasera i nie przekracza 50-80 m (np. Z+F Imager 5003, Leica HDS 4500, Faro LS HE80). Dla laserów impulsowych maksymalna odległość skanowania to 300-500 m (np. I-Site 4400, Leica HDS 3000), a dla laserów do zastosowań specjalnych nawet ponad 1 km (np. Riegl LPM-i800-HA, Riegl LPM-2K, Optech Iris 3₆D).



Rys. 4. U góry widok tzw. Death Box używanego do testowania rozdzielczości i szumów własnych skanerów. U dołu wyniki testów różnych skanerów: po lewej przekroje przez Death Box, po prawej widoki płyty czołowej. Źródło: i3mainz, Institute for Spatial Information and Surveying Technology, FH Mainz, University of Applied Sciences, Mainz

● **Maksymalna prędkość skanowania**

– w laserach fazowych dochodzi ona do 0,5 miliona pkt/s (np. Leica HDS 4500, Z+F Imager 5003), w najszybszych laserach impulsowych osiąga 4-5 tys. pkt/s (np. I-Site 4400, Leica HDS 3000).

● **Średnica plamki** – w najnowszych urządzeniach system skupiający wiązkę promienia laserowego pozwala na zredukowanie jej rozmiarów do 3-4 mm w odległości 50 metrów od instrumentu (np. Leica HDS 3000, Trimble seria GX).

● **Dokładność wyznaczania odległości** – dla laserów przydatnych w inwentaryzacji architektoniczno-budowlanej o zasięgu co najmniej 50 m dokładność ta dochodzi do 2-4 mm (np. Riegel LMS Z390, Leica HDS 3000, Leica HDS 4500, Trimble seria GX, Z+F Imager 5003).

● **Redukcja szumów własnych lasera** – dane publikowane przez producentów nie zawsze zgadzają się z wynikami uzyskiwanymi w praktyce; pojawiają się już jednak niezależne laboratoria (np. i3mainz – Institute for Spatial Information and Surveying Technology), które publikują wyniki własnych testów (rys. 4).

● **Pole widzenia** – niemal wszystkie skanery oferują obecnie pełny panoramiczny zakres pracy w poziomie (360°) i około 300° w pionie.

Skanery laserowe wyposażane są w coraz bardziej zaawansowane funkcje i stają się coraz bardziej autonomiczne. Wśród najistotniejszych nowości wymienić należy:

● wbudowanie kamery cyfrowej, co pozwala na rejestrację wartości RGB skanowanych punktów;

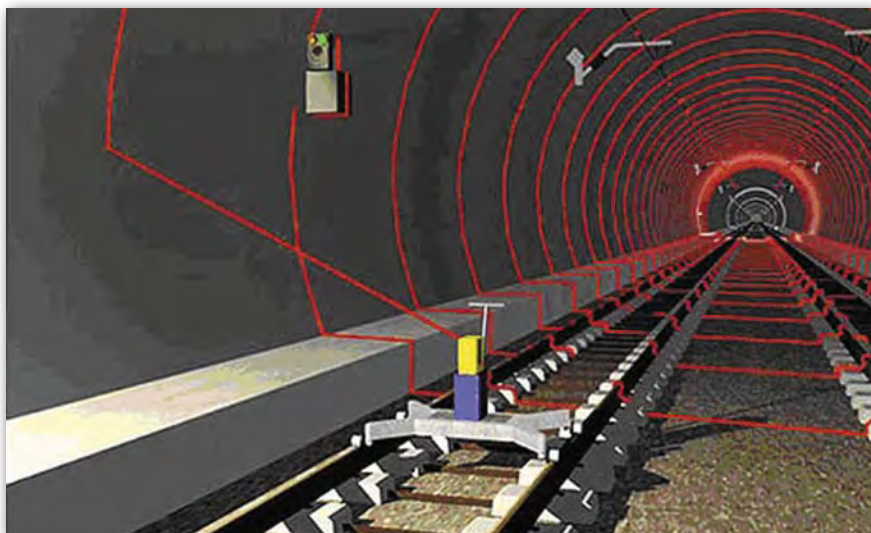
● współpracę z odbiornikami GPS, która umożliwi wyznaczenie bezwzględnej pozycji skanera;

● wprowadzenie dwuosioowych kompensatorów pozwalające na realizację także typowych zadań geodezyjnych;

● wbudowanie dysków HD i klawiatury eliminujące korzystanie z laptopa.

● **SKANOWANIE DYNAMICZNE**

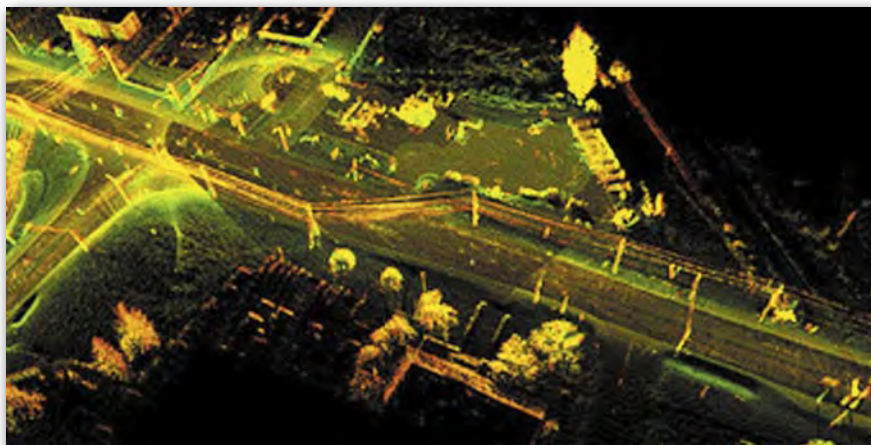
Na szczególną uwagę zasługuje tzw. skanowanie dynamiczne. Jest ono domeną ultraszybkich (rejestracja ponad 0,5 miliona pkt/s) skanerów fazowych montowanych na pojazdach kołowych lub szynowych (a także helikopterach czy samolotach, pominiętych w niniejszym artykule). Zwykle pracują one tylko w jednej, prostopadłej do toru jazdy płaszczyźnie (rys. 5-6). W rezultacie przemieszczania się wraz z pojazdem, urządzenie zbiera dane w promieniu 50-60 metrów od toru jazdy (rys. 7). Zależnie od modelu



Rys. 5. Schemat idei skanowania dynamicznego. Źródło: Zoller+Fröhlich



Rys. 6. Zestaw TITAN do dynamicznego skanowania 3D opracowany przez firmę Terrapoint. TITAN wykorzystywany był między innymi do inwentaryzacji pasa drogowego autostrady nr 1 w Afganistanie. Źródło: Terrapoint



Rys. 7. Skrzyżowanie dróg zarejestrowane za pomocą zestawu TITAN. Źródło: Terrapoint



Rys. 8. HURT³. Schemat systemu rejestracji i przetwarzania danych. Źródło: <http://dtsn.darpa.mil>

urządzenia prędkość prospekcji waha się od kilku do ponad 100 km/h. Technologia ta może być z powodzeniem stosowana przy planowanej w najbliższych latach modernizacji sieci drogowej i kolejowej w naszym kraju. Jej zastosowanie przyniosłoby znaczne oszczędności zarówno czasowe, jak i finansowe.

● WOJSKO A SKANOWANIE 3D

Podobnie jak w przypadku innych wysoko zaawansowanych technologii, rozwój skanowania 3D w dużej mierze wyznacza zastosowania militarne. Ponieważ prędzej czy później trafią one także do prac cywilnych, warto zwrócić uwagę na niektóre wymagania wojskowych w stosunku do tej technologii. Można je podzielić na kilka grup⁴:

● **Narzędzia do automatycznej poligonizacji (meshing tools) i generowania konturów w czasie rzeczywistym.** Elementem krytycznym jest tutaj wielkość potoku danych, które należy przetworzyć w czasie rzeczywistym, a także brak wydajnych narzędzi do redukcji siatki poligonów i symulacji brakujących danych w strefach cienia (czyli miejscach, do których promień lasera nie miał dostępu).

● **Automatyczna rejestracja danych i ich przetwarzanie.** Współczesne pole walki wymaga technologii pozwalających na szybkie i automatyczne tworzenie modeli 3D. Rozwiązaniem testowanym już dziś jest skanowanie z użyciem bezzałogowych samolotów (UAV – *Unmanned Air Vehicle*). Ciągłe

jednak przetworzenie takich danych do użytecznej postaci wektorowej zajmuje więcej czasu niż wymagane przez armię 8 godzin (rys. 8).

● **Automatyczna detekcja zmian realizowana w czasie rzeczywistym.** Oprogramowanie powinno automatycznie wychwytywać wszelkie różnice pomiędzy dwoma wykonanymi w dowolnym czasie skanami tej samej sceny. Pierwsze aplikacje tego typu są już dostępne.

● **Lepsze przetwarzanie informacji o kolorze.** Wprawdzie większość dzisiejszych skanerów wyposażona jest w kamery cyfrowe, ale automatyczne mapowanie koloru ogranicza się do powlekania chmury punktów pomiarowych informacją o wartości RGB. Potrzebne są wydajne narzędzia, które automatycznie dokonają ekstrakcji danych o kolorze i powlekania siatki poligonów mapami bitowymi. Dodatkowym wymogiem jest automatyczne skalowanie map bitowych równoległe ze skalowaniem lub redukcją siatki poligonów. Sądzę, że w najbliższym czasie pojawią się inne skuteczniejsze rozwiązania (np. rendering w trybie *ray-tracing* w czasie rzeczywistym).

● **Otwarte formaty danych.** Obecnie niemal każdy producent skanerów lub oprogramowania stosuje swój własny, niekompatybilny z innymi formatami danych, w którym przechowywane są chmury punktów. Stwarza to przeszkody w zamiennym stosowaniu sprzętu i aplikacji roboczych oraz znacznie spowalnia rozwój całej gałęzi przemysłu. Standaryzacja formatu w obrębie całe-

go sektora skupionego wokół skanowania 3D wydaje się konieczna i nieunikniona.

● SKANOWANIE 3D A GIS

Wprawdzie skanowanie 3D uważa się już dziś za technologię w pełni dojrzałą, ale prawdziwa rewolucja jest jeszcze przed nami. W moim przekonaniu wiąże się ona z zastosowaniem dynamicznego skanowania do tworzenia szczegółowych trójwymiarowych modeli miast, osiedli i terenów nieurbanizowanych. Modele takie stają się dzisiaj podstawą zarówno do prowadzenia różnorodnych analiz, jak i zarządzania tymi obszarami. Tradycyjne płaskie GIS 2D zastępowane są powoli przez GIS 3D. Specjalistyczne aplikacje towarzyszące takim modelom pozwalają na symulację i analizę wielu procesów, które dotychczas były trudne do ujęcia na drodze modelowania płaskiego (np. warunki przewietrzania miasta, badanie poziomu hałasu).

Wiele miast, w tym i Wrocław, zainwestowało znaczne środki w budowę takich modeli. Dane pozyskuje się zazwyczaj z ultraszybkich skanerów fazowych i kamer cyfrowych zamontowanych na pokładach samolotów. Jak pokazuje jednak przykład Wrocławia, dane te pozwalają na stworzenie tylko bardzo ogólnego, zgrubnego modelu. Konieczne w wielu przypadkach uszczegółowienie informacji jest najczęściej realizowane poprzez wykorzystanie skanerów stacjonarnych lub laserów fazowych zainstalowanych na samochodach.

● 3D W INWENTARYZACJI ZABYTKÓW

Zarówno tradycyjne, jak i dynamiczne skanowanie 3D ma także szerokie zastosowanie w przypadku inwentaryzacji budowlano-konserwatorskich. Jego rangę podkreśla powołanie przez International Council on Monuments and Sites (ICOMOS) oraz International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) specjalnej grupy roboczej zajmującej się tą technologią. Powstała ona w ramach International Committee for Architectural Photogrammetry (CIPA). Tematyka ta cieszy się także dużym zainteresowaniem na organizowanych co kilka lat międzynarodowych konferencjach poświęconych tematyce zdalnej detekcji w archeologii oraz corocznych warsztatach FIG.

Praktycznie każde z pól zastosowań skanowania 3D ma swoje szczególne cechy i wymagania. Wydaje się jednak, iż

zastosowanie tej technologii w konserwacji zabytków i archeologii jest chyba najbardziej specyficzne i z tego względu warto mu poświęcić nieco więcej uwagi. W istocie mamy bowiem do czynienia z dwoma zupełnie odrębnymi polami eksploatacji. Pierwszym jest proces dokumentacji, rozumiany jako archiwizacja wszystkich możliwych do pomiarzenia elementów geometrii i fizycznego wyglądu. W tym przypadku wymogi konserwacji zabytków i archeologii w stosunku do nowej technologii nie odbiegają istotnie od innych dziedzin. Co najwyżej, zwiększają się wymagania odnośnie rozdzielczości skanera, precyzji rejestracji koloru i swobody w modelowaniu skomplikowanych powierzchni.

Zupełnie inaczej przedstawia się problem dokumentacji rozumianej jako rejestracja obserwacji badawczych. W tym przypadku technologia skanowania 3D jest wprawdzie również pomocna, ale niesie ze sobą określone niebezpieczeństwa. Tradycyjna metoda żmudnej i czasochłonnej ręcznej inwentaryzacji, wymagającej pomiarzenia i narysowania każdej cegły, kamienia i belki z osobna, zmuszała badacza do fizycznego kontaktu z każdym z inwentaryzowanych elementów. Mierząc, a następnie rysując, miał okazję dokładnie mu się przyjrzeć, zrozumieć jego formę, przestrzenne położenie, zaobserwować cechy indywidualne – innymi słowy, obejrzeć go z każdej strony. Tylko bowiem w ten sposób jesteśmy w stanie zarejestrować wszystkie informacje ukryte przed powierzchownym oglądem. Ręcznie sporządzany rysunek inwentaryzacyjny – pozostawiający często wiele do życzenia co do dokładności odwzorowania geometrii – był tu dowodem, iż badacz faktycznie dotykał i analizował każdą cegłę, kamień i belkę.

• TECHNIKA A OKO BADACZA

W przypadku stosowania techniki skanowania (i innych procesów automatycznych) pojawia się niebezpieczeństwo powierzchowności wyników badań. W skrajnym przypadku, być może niedługo, będziemy mieli precyzyjnie zarejestrowane automatycznie wierne kopie rzeczywistości fizycznej. Ale z tego niekoniecznie muszą wynikać efekty poznawcze. Badacz będzie wiedział o istocie przedmiotu tak samo niewiele, jak przed wysianiem w teren „inwentaryzacyjnego robota”. A przeniesiona do jego gabinetu wirtualna rzeczywistość będzie dla niego równie nieznana jak po-

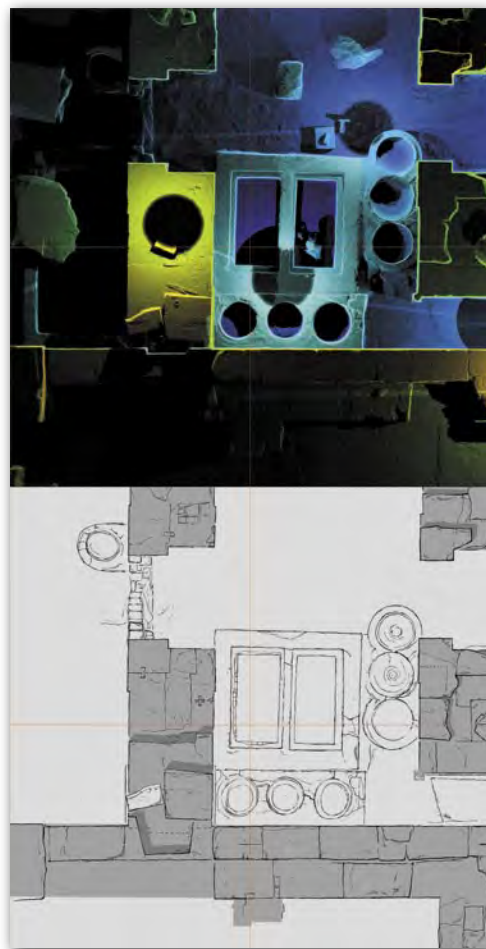
przednio, choć będzie mógł w dowolnym momencie wracać do przedmiotu badań, nawet gdy realny obiekt przestanie już istnieć.

Dziś, w świetle ograniczonych jeszcze własnych doświadczeń z wykorzystaniem technologii skanowania 3D w badaniach architektonicznych i archeologicznych, nie potrafię wskazać skutecznego rozwiązania tego problemu. Mogę jedynie podzielić się doraźnym sposobem wypracowanym w trakcie trzech sezonów badań prowadzonych z użyciem skanera 3D wraz z niemieckimi kolegami⁵ na terenie świątyni Repit w Athribis (Sohag) w Górnym Egipcie.

Zebrane wówczas dane pozwoliły na opracowanie wektorowego modelu świątyni, tak jak dzieje się to w przypadku wszystkich innych zastosowań technologii skanowania 3D. Jednocześnie służyły one nam jako podkład do tradycyjnego, ręcznego sporządzania w terenie rysunków dokumentacyjnych (rys. 9). Dzięki temu uwolniliśmy się od najbardziej pracochłonnej czynności – tradycyjnego pomiaru geometrii obiektu. Cały nasz czas i uwagę mogliśmy więc skoncentrować na analizowaniu obiektu oraz na zapisywaniu obserwacji w postaci rysunku dokumentacyjnego. Mieliśmy przy tym pewność, że zarówno geometria poszczególnych elementów, jak i całego obiektu, odwzorowana jest z absolutną wiernością. Zamieszczone obok rysunki przedstawiają wygenerowany za pomocą oprogramowania Cyclone (Leica Geosystems) podkład, na którym skala barwna odpowiada składowej „z” pomierzonego punktu oraz ręcznie wykonany rysunek dokumentacyjny tego samego fragmentu świątyni. Muszę jednak przyznać, iż w trakcie pracy na obiekcie, pomimo wieloletniego doświadczenia w badaniach terenowych, wielokrotnie łapałem się na automatycznym przerysowywaniu wygenerowanego przez komputer podkładu, bez niezbędnego oglądu i dokładnej analizy każdego z dokumentowanych elementów.

I to, w moim przekonaniu, stanowi istotne niebezpieczeństwo w bezkrytycznym stosowaniu skanowania 3D w pracach architektonicznych i konserwatorskich. O ile bowiem można sobie wyobrazić zastąpienie mierniczego przez maszynę, to nie widzę możliwości zastąpienia badacza przez maszynę.

Jednak wszystkie te zastrzeżenia i obawy nie umniejszają mojego entuzjazmu do technologii skanowania 3D ani prze-



Rys. 9. Fragment opracowanych jako hipsometria danych ze skanowania świątyni Repit w Egipcie i ręcznie wykonany na jego podstawie rysunek dokumentacyjny. Opracowanie: J. Kościuk i D. Gola

konania, iż w ciągu kilku najbliższych lat stanie się ona niezbędnym narzędziem pracy inżyniera, architekta, archeologa i badacza.

JACEK KOŚCIUK

jest dyrektorem Instytutu Historii Architektury, Sztuki i Techniki na Wydziale Architektury Politechniki Wrocławskiej

Przypisy:

- ¹por. J. Kościuk, Inwentaryzacja komputerowa dla potrzeb konserwacji zabytków, w: REMO 2000. IX Konferencja Naukowo-Techniczna. Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych, Wrocław 2000, s. 19-39.
- ²Tabelaryczne zestawienie parametrów skanerów ukazało się w GEODECIE 6/2006.
- ³HURT – Heterogeneous Urban RSTA (Reconnaissance, Surveillance and Target Acquisition) Team – Heterogeniczny Miejski Zespół Rekonstrukcji, Zwiadu i Namierzania Celu. Wart niemal 12 milionów dolarów projekt badawczy Agencji Obrony i Sił Powietrznych USA.
- ⁴Opracowano na podstawie materiałów dostępnych na stronach Spar Point Research LLC, <http://www.sparllc.com/>.
- ⁵Misja prowadzona jest przez Instytut Egiptologii Uniwersytetu w Tybindze. Autor jest głównym architektem i głównym konserwatorem misji.