

METODY FOTOGRAMETRII CYFROWEJ I SKANOWANIA LASEROWEGO W INWENTARYZACJI ZABYTKÓW

THE DIGITAL PHOTOGRAMMETRY AND LASER SCANNING METHODS USED FOR HERITAGE DOCUMENTATION

Adam Boroń¹, Antoni Rzonca^{1,2}, Andrzej Wróbel¹

¹Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej, Akademia Górniczo-Hutnicza

²Dephos Sp. z o.o.

Słowa kluczowe: dokumentacja architektoniczna, inwentaryzacja zabytków, fotogrametria, skaner laserowy

Keywords: architectural documentation, historic monuments recording, photogrammetry, laser scanner

Wstęp

Klasyczne, analogowe formy metrycznej dokumentacji zabytków architektury oraz innych przestrzennych obiektów zabytkowych to tzw. rzuty, przekroje i widoki powstałe w wyniku przecinania i rzutowania obiektu na wybrane płaszczyzny. Przeważnie przedstawiane były w postaci papierowych planów rysunkowych w różnych skalach. Zdarzało się przedstawianie widoków obiektu w postaci fotograficznej (fotoplany analogowe). Wymienione, analogowe rodzaje opracowania były stosowane w Europie mniej więcej do połowy lat osiemdziesiątych XX wieku.

Wraz z rozwojem technik komputerowych dokumenty te zaczęto przedstawiać również w postaci numerycznej typu CAD i cyfrowej, zapisanych w formie plików wektorowych i rastrowych. Wydruki papierowe dokumentacji są tylko kopia opracowania cyfrowego, o wiele mniejszych walorach użytkowych od cyfrowej postaci źródłowej. Techniki cyfrowe umożliwiają bowiem wykonanie zarówno planów kreskowych (wektorowych) jak i fotoplanów jako dokładniejszych i o wyższej rozdzielczości (szczegółowości) ponieważ nie posiadają one ograniczeń związanych ze skalą wydruku.

Korzystanie z cyfrowej formy dokumentacji wymaga od użytkownika dostępu do oprogramowania, w którym nie tylko można przeglądać dokumentację, ale również interaktywnie tworzyć na jej podstawie inne dokumenty w grafice wektorowej i rastrowej. Wymaga to przedstawienia dotychczasowych użytkowników papierowych wydruków do pracy z obrazem na ekranie komputera. Miniaturyzacja komputerów (notebooki) sprzyja pracy z dokumentacją cyfrową *on line*, – np. bezpośrednio w trakcie prac konserwatorskich na obiekcie.

Metody komputerowe, poza zmianą postaci dokumentacji klasycznej, doprowadziły do powstania nowych form dokumentacji, niemożliwych wcześniej do udostępnienia lub wykonania. Pojawiła się możliwość stosunkowo łatwego opracowania przestrzennej prezentacji obiektów oraz wykorzystania cyfrowych półproduktów fotogrametrycznych, jako źródła metrycznej informacji o obiekcie. Obserwuje się również szybki rozwój niemetrycznych cyfrowych dokumentacji wizualnych (panoramy i stereogramy).

Fotogrametryczne metody pomiaru obiektów zabytkowych

Zdjęcie fotogrametryczne jest wiernym obrazem obiektu w rzucie środkowym. W porównaniu do obrazu który uzyskalibyśmy w wyniku rzutowania prostopadłego (mapa) posiada on zniekształcenia (odchyłki radialne) wynikające z nachylenia zdjęcia i nie płaszczyznowości obiektu. Przekształcenie rzutowe zdjęcia eliminuje przesunięcia radialne spowodowane jego nachyleniem, lecz nie usuwa zniekształceń wynikających z nie płaszczyznowości (deniwelacji) obiektu. Zniekształcenia te nie mogą przekroczyć zakładanej dokładności dokumentacji, dlatego odchyłki radialne możemy zaniedbać jedynie dla obiektów, których odchylenia od płaszczyznowości są zerowe lub niewielkie (obiekty płaskie). W przypadkach innych, rozbudowanych przestrzennie obiektów, odchyłki radialne mogą być bardzo duże uniemożliwiając opracowanie na podstawie pojedynczych zdjęć. W związku z powyższym w zależności od geometrycznej formy obiektu stosowane są dwie metody opracowań fotogrametrycznych: jednoobrazowa i dwuobrazowa.

Metoda jednoobrazowa

W metodzie jednoobrazowej opracowanie wykonuje się na podstawie pojedynczych zdjęć obiektu. Metoda ta może być stosowana jedynie w przypadku, gdy inwentaryzowany obiekt jest płaski lub, gdy można go z wystarczającym przybliżeniem aproksymować płaszczyzną. W inwentaryzacji obiektów zabytkowych będą to przede wszystkim malowidła na płaskich ścianach oraz nierozbudowane przestrzennie, płaskie elewacje budynków (bez balkonów, dużych gzymsów i innych elementów wystających znacznie z płaszczyzny ściany). Możliwe jest opracowanie tą metodą również, obiektów wielopłaszczyznowych. W tym przypadku opracowanie końcowe składa się z połączonych opracowań cząstkowych wykonanych niezależnie dla każdej z płaszczyzn obiektu. Zdjęcia pomiarowe należy wykonywać w przybliżeniu równoległe do płaszczyzny obiektu, przy czym im odległość od obiektu do stanowiska kamery jest większa tym mniejsze będą odchyłki radialne na zdjęciu, a tym samym większa wewnętrzna dokładność opracowania. Odległość stanowiska od obiektu nie może być wybrana dowolnie, bowiem od jej wielkości i od ogniskowej stosowanego obiektywu zależy skala obrazu, a tym samym dokładność późniejszego opracowania.

Docelowa dokładność opracowania zależy głównie od uzgodnień ze zleceniodawcą. Próba ujednoczenia wymogów dokumentacji zabytków architektury są wytyczne GUGiK G3.4 – „Inwentaryzacja zespołów urbanistycznych, zespołów zieleni i obiektów architektury”. Przewidują one dla typowych opracowań architektonicznych dokładność terenową w zakresie 1-2 cm.

Dokumentacja malowideł ściennych, ze względu na ich mniejsze wymiary, musi być z reguły wykonana z większą dokładnością – rzędu pojedynczych milimetrów.

W przypadku dokumentacji cyfrowej w postaci rastrowej (fotoplany) należy omówić jeszcze problem rozdzielczości dokumentacji, która ma podstawowe znaczenie dla jakości fotoplanu, a nie musi być ściśle związana z jego dokładnością. Przez rozdzielczość należy rozumieć rozróżnialność szczegółów dokumentacji. Zwykło się ją definiować wielkością piksela terenowego (obiekтового) cyfrowego obrazu wynikowego. Wielkość tego piksela, jednako dla wszystkich pikseli obrazu dokumentacji, jest iloczynem mianownika skali zdjęcia i wielkości piksela obrazowego. Najczęściej przyjmuje się, że rozdzielczość dokumentacji jest zawsze większa od jej dokładności. Dobra rozdzielczość dokumentacji ma szczególnie duże znaczenie przy korzystaniu z jej postaci cyfrowej. Powiększanie obrazu fotoplanu na monitorze komputera prowadzi do określenia granicy powiększenia, dla której obraz staje się nieczytelny i widoczna jest jego struktura pikselowa. Właściwa rozdzielczość zdjęć źródłowych i opracowanego na ich podstawie fotoplanu zapewnia nam, że powyższa granica maksymalnego powiększenia nie musi być przekraczana, bowiem możliwe jest uzyskanie właściwej rozróżnialności szczegółów w skali 1: 1 (1 piksel obrazu = 1 piksel monitora) i mniejszej.

Autorzy uważają, że dla fotoplanów architektury (elewacje, ściany, mury itp.) terenowy rozmiar piksela powinien wynosić od 2 do 5 mm, a dla malowideł nie więcej niż 1 mm.

Zdjęcia pomiarowe w metodzie jednoobrazowej można wykonywać zarówno wielkoformatowymi, analogowymi kamerami fotogrametrycznymi, jak również aparatami cyfrowymi. W przypadku tych ostatnich, ze względu na jej wielkość, należy wyeliminować dystorsję radialną obiektywu aparatu, ponieważ stanowi ona źródło błędów systematycznych.

Metoda dwuobrazowa

Obiekty rozbudowane przestrzennie muszą być opracowywane na podstawie par zdjęć stereoskopowych (stereogramów). Położenie wyznaczonych punktów określa się wówczas za pomocą wcięcia w przód, co umożliwia usunięcie wpływu odchyłek radialnych homologicznych punktów obu zdjęć na dokładność wynikową. Stereogram zdjęć pomiarowych wykonuje się z dwóch stanowisk – końców bazy fotogrametrycznej. O dokładności opracowania decyduje zarówno skala zdjęć jak i długość bazy. Im większa skala obiektu na zdjęciu oraz długość bazy – tym wyższa dokładność opracowania. Na fotogrametrycznych stacjach cyfrowych z wykorzystaniem stereogramów zdjęć pomiarowych wykonuje się opracowania w formie wektorowej, odpowiadające klasycznej dokumentacji kreskowej (rzuty, przekroje, widoki) oraz ortofotoplany widoków elewacji lub fotoplany malowideł z wykorzystaniem jednego lub obu zdjęć stereopary. Dla obiektów niepłaskich stereogram zdjęć fotogrametrycznych jest źródłem informacji o przestrzennym rozmieszczeniu poszczególnych punktów obiektu potrzebnej do usunięcia zniekształceń obrazu spowodowanych rzutowaniem środkowym.

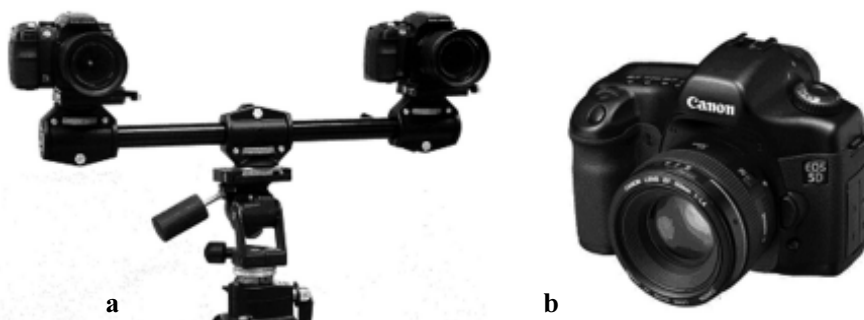
Metodę dwuobrazową wykorzystujemy również przy wykonywaniu rozwinięć malowideł umieszczonych na powierzchniach rozwijalnych (z reguły sklepienia kolebkowe) oraz odwzorowań malowideł z powierzchni nierozwijalnych (np. sfera). Stereogramy dostarczają wówczas informacji o geometrii sklepienia oraz stanowią źródłowy materiał fotograficzny dla wykonania fotoplanu rozwinięcia.

Etapy fotogrametrycznej inwentaryzacji obiektów zabytkowych

Proces inwentaryzacji fotogrametrycznej obiektu zabytkowego można podzielić na następujące główne etapy:

- założenie i pomiar osnowy geodezyjnej i fotogrametrycznej,
- wykonanie zdjęć pomiarowych,
- wstępne prace kameralne,
- opracowanie dokumentacji cyfrowej,
- wydruki i archiwizacja dokumentacji cyfrowej.

Zarówno przetwarzanie pojedynczych zdjęć jak i opracowania stereoskopowe wymagają posiadania punktów dostosowania (fotopunktów) – czyli punktów o znanym położeniu w przestrzeni (X,Y lub X,Y,Z) i zarejestrowanych na zdjęciach. Są one specjalnie sygnalizowane przed wykonaniem zdjęć lub wybierane na obiekcie, jako wyraźne szczegóły sytuacyjne. Wszystkie fotopunkty muszą być pomierzone, z reguły metodami geodezyjnymi, i muszą posiadać współrzędne w jednolitym układzie odniesienia. W przypadku dużego obiektu należy najpierw założyć osnowę geodezyjną, którą stanowi sieć połączonych pomiarami geodezyjnymi punktów stanowiących dalej stanowiska instrumentu dla pomiaru osnowy fotogrametrycznej (fotopunktów). Obecnie pomiar osnowy geodezyjnej i fotogrametrycznej wykonuje się elektronicznymi tachimetrami. W przypadku osnowy fotogrametrycznej najczęściej pomiar prowadzi się tachimetrami z bezlustrowym pomiarem odległości.



Rys. 1. Cyfrowe kamery niemetryczne wykorzystywane w inwentaryzacji fotogrametrycznej: a – kamera stereometryczna – dwa sprzężone aparaty cyfrowe Minolta Dynax 5D, b – Canon EOS 5D lustrzanka o formacie matrycy 24x36 mm i rozdzielczości 13 mln pikseli

Do wykonywania stereogramów pomiarowych wykorzystuje się, obecnie rzadko, analogowe kamery fotogrametryczne wyposażone w urządzenia do realizacji równoległości osi obu zdjęć np. kamera UMK 10/1318 Zeissa. Powszechne jest natomiast stosowanie aparatów cyfrowych, dla których w wyniku kalibracji wyznaczono elementy orientacji wewnętrznej oraz parametry dystorsji obiektywu. Dla niewielkich obiektów najlepiej stereogramy takie wykonywać z końców specjalnie skonstruowanej bazy zapewniającej zmianę jej długości oraz równoległość osi aparatów (rys. 1a). Aparatami cyfrowymi wykorzystywanymi w fotogrametrii są lustrzanki cyfrowe z obiektywami stałogniskowymi i matrycami o jak największej rozdzielczości i wielkości (rys 1b). Do wykonywania pojedynczych zdjęć można rozszerzyć zakres powyższego sprzętu o aparaty cyfrowe z obiektywami typu „zoom” pod warunkiem znajomości modeli dystorsji obiektywu.

Do wstępnych prac kameralnych należy zaliczyć obliczenia współrzędnych osnowy geodezyjnej i fotogrametrycznej, skanowanie zdjęć analogowych oraz strojenie modeli w autografach analitycznych i cyfrowych.

Mniej więcej do końca lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku opracowanie fotogrametryczne w całości oparte było na sprzęcie analogowym; od kamer rejestrujących zdjęcia na kliszach szklanych lub błonie filmowej po analogowy sprzęt do wykonywania przetwarzania pojedynczych zdjęć (przetworniki) lub opracowania stereogramów (autografy). Postęp w elektronice i informatyce w pierwszej kolejności został wykorzystany na etapie opracowania kameralnego. Analogowe przetworniki zastąpiono oprogramowaniem do przetwarzania obrazów cyfrowych, a mechaniczne autografy autografami analitycznymi, które na początku lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku zastąpiono autografami cyfrowymi lub fotogrametrycznymi stacjami cyfrowymi. Obecnie wszystkie produkty dokumentacji cyfrowej obiektów zabytkowych można wykonać z wykorzystaniem fotogrametrycznej stacji cyfrowej, która służy zarówno, jako autograf cyfrowy do pomiarów i wektoryzacji stereoskopowego, zestrojonego modelu 3D, jak również do przetwarzania obrazów cyfrowych metodą ortofoto (z wykorzystaniem numerycznego modelu obiektu). W zależności od typu stacji mogą być również zaimplementowane moduły przetwarzania obrazów metodą transformacji rzutowej, elementów skończonych i wielomianowej, moduł do mozaikowania przetworzonych zdjęć w cały fotoplan (ortofotoplan), moduł do korekcji radiometrycznej fotoplanów, moduły do tworzenia numerycznego modelu obiektu, moduły obliczenia i wyrównania terratriangulacji itp. Wszystkie te moduły mogą również występować jako osobne programy.

Końcowym etapem inwentaryzacji jest wykonanie wydruków wszystkich produktów dokumentacji w uzgodnionej skali oraz zarchiwizowanie ich cyfrowych oryginałów. Pliki wektorowe i rastrowe powinny mieć nazwy umożliwiające ich identyfikację. Katalogi, w których umieszczone zostaną produkty powinny posiadać przejrzystą strukturę i umożliwiać szybki dostęp do wybranych dokumentów. Zastosowane uniwersalne formaty dokumentów rastrowych i wektorowych powinny umożliwiać ich wczytanie do większości programów obecnych na rynku. Coraz częściej do dokumentacji dołącza się interaktywną przeglądarkę umożliwiającą przeglądanie produktów dokumentacji, materiałów źródłowych i opisowych.

Skanowanie laserowe

Pozyskiwanie danych w technice skanowania laserowego (*laser scanning*) polega na wyznaczeniu przestrzennego położenia elementów wektorowych opisujących geometrię mierzonego obiektu i ewentualnym przypisaniu im wartości radiometrycznych w skali szarości, sztucznej palety barwnej lub barw naturalnych w postaci składowych RGB.

Rejestrowane elementy wektorowe to punkty o współrzędnych przestrzennych XYZ tworzące tzw. chmurę punktów lub trójkąty w postaci sieci nieregularnej (ang. TIN – *triangular irregular net*). Skanery laserowe to przyrządy do pomiaru bezpośredniego. O uzyskanym wyniku decydują parametry instrumentu, jego położenie w stosunku do mierzonego obiektu, a także materiał, z którego obiekt jest wykonany (współczynnik odbicia). Skanowaniu mogą podlegać obiekty zabytkowe o wielkiej rozpiętości rozmiarów. Mogą to być obiekty w skali mikro (monety, biżuteria), obiekty małe (meble, epitafia, nagrobki), średnie (ołtarze, ściany wewnętrzne), a także obiekty o dużych gabarytach (całe budowle lub ich zespoły). Oprócz pomiaru położenia, w niektórych skanerach istnieje możliwość rejestracji odcienia szarości lub koloru i przypisywania go właściwemu punktowi chmury. Stopień szarości piksela jest funkcją intensywności promieniowania powracającego do skanera, odbitego od obiektu w momencie pomiaru. (Baranowski i in., 2005).

Podstawowym, często ograniczającym możliwości zastosowania skanowania, wymaganiem związanym z pozyskiwaniem danych jest, oprócz oczywistej widoczności elementów mierzonych, absolutna stabilność instrumentu podczas wykonywania pomiaru oraz nieruchomość obiektu pomiaru.

Laserowe skanery naziemne dzielą się na skanery typu LIDAR oraz skanery optyczne (Boehler, Marbs, 2002).

Skanery typu LIDAR (zwane też *time-of-flight*) działają na zasadzie biegunowego pomiaru położenia punktów. Wiązka laserowa jest wysyłana pod zadaniem kątem poziomym i pionowym, a mierzony czas przelotu do obiektu i czas powrotu po odbiciu od obiektu jest przeliczany na odległość. W czasie rzeczywistym wyliczane są współrzędne przestrzenne, a rejestrowany poziom odbicia zapisywany jest, jako czwarty wymiar. Niektóre skanery wyposażone są w kamery cyfrowe. Zarejestrowane przez nie obrazy umożliwiają przypisanie każdemu pomierzonemu punktowi składowych barwnych RGB. W tabeli 1 podano podstawowe parametry skanerów typu LIDAR, parametry, których wartościami należy kierować się przy odpowiednim doborze instrumentu dla danego obiektu. Najważniejszymi parametrami są zasięg oraz dokładność pomiaru kątów i odległości. Pole widzenia skanera jest istotne z punktu widzenia ergonomii. Jeśli jest niewielkie, pomiar trwa dużo dłużej.

Tabela 1. Zestawienie podstawowych parametrów technicznych skanerów typu LIDAR (Boehler, Marbs, 2002)

Skaner	Cyrax HDS 2500	Mensi GS 200	Riegl LMS Z420i	Zoller+Froehlich Imager 5003 25200 (5350)
Zasięg max. [m]	100	200–700	>800	25 (53)
Pole widzenia w pionie [°]	40	60	80	30–180
Pole widzenia w poziomie [°]	40	360	360	360
Dokładność kątowa [°]	±0,0034	–	±0,002 V, ±0,0025 Hz	±0,01
Dokładność pom. odległości [mm]	±4	±3	±2	±2-4

Skanery typu LIDAR stosowane są do większości obiektów, z wyjątkiem skali mikro. Dzieje się tak z uwagi na ich charakterystykę dokładnościową – błąd położenia punktu na poziomie kilku milimetrów, jak również z uwagi na osiąganą rozdzielczość kątową pomiaru.

Do precyzyjnego pomiaru obiektów w skali mikro oraz małych stosuje się skanery optyczne. Dzielą się one z uwagi na zastosowane rozwiązania na dwie podgrupy: skanery triangulacyjne oraz skanery światła strukturalnego (Iuliano, Minetola, 2005).

Skanery triangulacyjne wysyłają z projektora promieniowanie pod zmiennym kątem, wiązka odbita od obiektu pada na matrycę CCD umieszczoną w obiektywie, który oddalony jest od projektora o znaną wielkość – bazę. Na podstawie kąta emisji realizowanego przez obrotowy pryzmat, znajomości długości bazy oraz miejsca rejestracji powracającego promienia następuje rozwiązanie trójkąta i wyznaczenie współrzędnych położenia wierzchołka. Natomiast skanery światła strukturalnego oświetlają obiekt poruszającymi się paskami lub punktami. Kamera rejestruje obraz pasków lub punktów, który z racji kształtu obiektu jest zniekształcony i porównuje go z wzorcem. Odkształcenie się rzutowanego, ruchomego obrazu służy do wnioskowania na temat geometrii mierzonego obiektu. Pomiar ciągły geometrii prowadzi często do automatycznego powstania siatki trójkątów TIN. W tabeli 2 podano podstawowe parametry wybranych skanerów optycznych.

Tabela 2. Podstawowe parametry przykładowych skanerów optycznych.

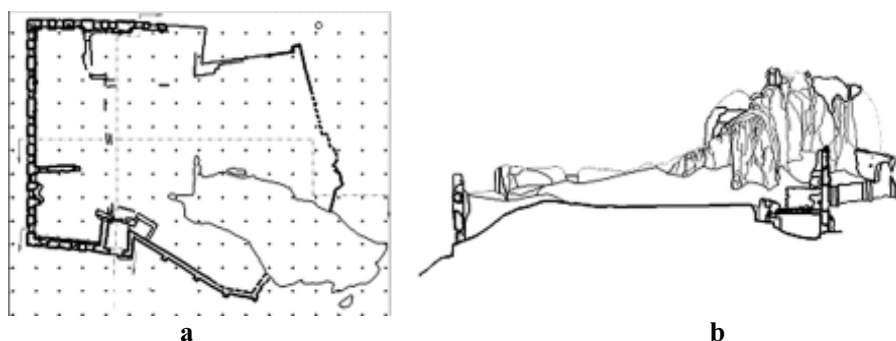
Skaner	Konica-Minolta Vivid-900	GOM GmbH. ATOS Standard
Typ	Laser triangulacyjny	Światło strukturalne
Zakres pracy [mm]	600–1200	300–1100
Dokładność [mm]	$\pm 0,17$ wzdłuż osi XY $\pm 0,05$ wzdłuż osi Z	Od $\pm 0,06$ do $\pm 0,50$

Produkty inwentaryzacji fotogrametrycznej i skanowania laserowego

Poniżej omówione pokrótce zostaną wszystkie produkty inwentaryzacji fotogrametrycznej obiektów zabytkowych. Należy zauważyć że technika skanowania laserowego nie tworzy nowych produktów, a jedynie umożliwia w inny sposób wykonanie tych samych dokumentów (poza chmurą punktów, którą jednak trudno nazwać produktem raczej półproduktem).

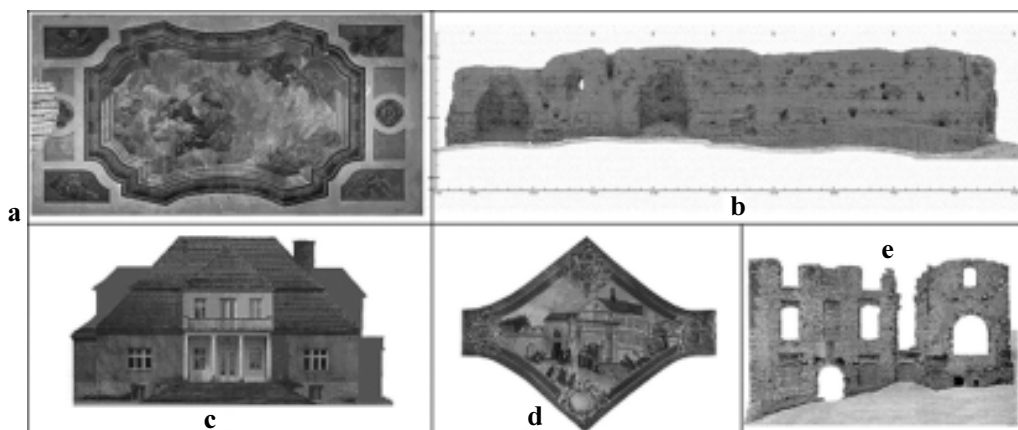
Dokumentacja 2D

Dokumentacja 2D może posiadać formę wektorową i rastrową. Klasyczne, wektorowe produkty metrycznej dokumentacji zabytków architektury oraz innych przestrzennych obiektów zabytkowych to tzw. rzuty, przekroje i widoki powstałe w wyniku przecinania i rzutowania obiektu na wybrane płaszczyzny. Natomiast forma rastrowa (fotograficzna) produktów 2D to fotoplany i ortofotoplany. Wszystkie te produkty mogą powstać albo z wykorzystaniem fotogrametrycznej stacji cyfrowej albo autografu cyfrowego i specjalistycznych programów. Wektorowe mapy, oraz rzuty poziome i przekroje pionowe powstają w wyniku pomiaru stereoskopowego na autografie cyfrowym, gdzie operator obwodzi znacznikiem pomiarowym (zapisując w postaci wektorów) wybrane krawędzie obiektu lub ślady przecięcia obiektu z płaszczyznami tnącymi. Wyniki pomiaru zapisywane są w układzie przestrzennym (X, Y, Z), a wybrany produkt powstaje w wyniku rzutowania przestrzennego rysunku wektorowego na wybraną płaszczyznę odniesienia. Na rysunku 2 pokazano przykładowy przekrój poziomy i pionowy z odpowiednimi widokami obiektu (Boroń i in., 2004).



Rys. 2. Przykładowe wektorowe rysunki dokumentacyjne 2D: a – przekrój poziomy (rzut obiektu) z widokiem w dół, b – przekrój pionowy obiektu z widokiem na zachód

Produkty wektorowe są wyciągiem rysunkowym treści zdjęć pomiarowych, przez to są bardziej przejrzyste, ale mogą posiadać błędy wynikające z subiektywnej interpretacji obiektu przez operatora autografu. Pozbawione tych wad są coraz popularniejsze fotoplany obiektu, w których przekształcone z rzutu środkowego do rzutu ortogonalnego zdjęcie pomiarowe jest produktem metrycznym wraz z całą zawartą w nim informacją. Wyróżniamy trzy metody uzyskania fotoplanów: wykorzystującą przekształcenie rzutowe; wybranych, specjalnych transformacji i ortorektyfikacji. Pierwsza z metod, najprostsza, stosowana jest wtedy, gdy mamy do czynienia z obiektem lub malowidłem płaskim. Polega na przekształceniu zdjęcia na fotomapę z wykorzystaniem transformacji rzutowej opisującej zależność rzutowe pomiędzy punktami płaszczyzny zdjęcia a punktami płaszczyzny obiektu. Wymaga ona, co najmniej czterech punktów dostosowania (fotopunktów). Na podstawie określonych współczynników transformacji przetwarzany jest każdy piksel obrazu źródłowego w piksel fotomapy. Pozostałe metody tworzenia fotoplanów dotyczą obiektów niepłaskich o nieregularnych powierzchniach. W drugiej stosowana jest transformacja metodą elementów skończonych. Na podstawie dużego zbioru punktów pomierzonych na obiekcie i tych samych punktów danych współrzędnymi pikselowymi na obrazie cyfrowym tworzona jest siatka trójkątów przystających umożliwiającą przekształcenie obrazu każdego trójkąta ze zdjęcia w obraz trójkąta na mapie. Należy tutaj jeszcze wspomnieć o transformacji wielomianowej wykorzystywanej do tworzenia fotoplanów rozwinięć malowideł z powierzchni niepłaskich. Może być ona stosowana na równi z metodą elementów skończonych, ale przy regularnych powierzchniach sklepień daje lepsze wyniki (Boroń i in., 2006). Trzecia, najbardziej dokładna metoda „ortofoto”, polega na przetworzeniu każdego piksela obrazu źródłowego w ortofotogram z wykorzystaniem znajomości elementów orientacji zewnętrznej zdjęć oraz numerycznego modelu obiektu. Każdy piksel ortofotogramu jest rzutowany na numeryczny model obiektu, skąd po uzyskaniu trzeciej współrzędnej punkt ten jest dalej rzutowany środkowo na zdjęcie źródłowe skąd pobierana jest informacja radiometryczna. W taki sposób piksel po pikselu realizowany jest cały ortofotogram.



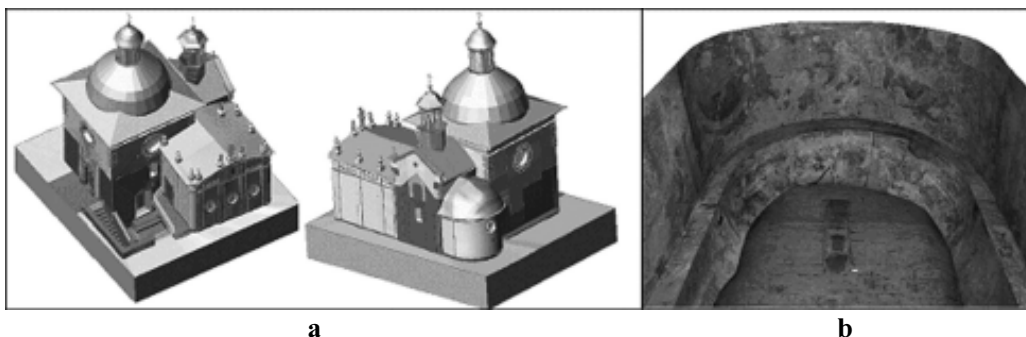
Rys. 3. Fotoplany cyfrowe wykonane różnymi metodami: a – fotoplan polichromii wykonany metodą przekształcenia rzutowego, b – fotoplan murów wykonany metodą elementów skończonych, c – fotoplan budynku wykonany metodą ortofoto (ortofotoplan), d – fotoplan rozwinięcia malowidła ze sklepienia kolebkowego wykonany metodą wielomianową, e – fotoplan wielopłaszczyznowej elewacji wykonany metodą wielokrotnego przekształcenia rzutowego

Dokumentacja 3D

Pomiar wektorowy obiektu zabytkowego w autografie cyfrowym dla potrzeb utworzenia mapy 2D elewacji obiektu (widok) obejmuje krawędzie, które nie pokrywają się w rzucie na płaszczyznę odniesienia. W przypadku wykonania ortofotomapy obiektu powinien zostać pomierzony na autografie numeryczny model obiektu. Pomiar takiego modelu wymaga wektoryzacji wszystkich krawędzi, poza liniami należącymi do jednej płaszczyzny. Połączenie obu typów pomiarów prowadzi do uzyskania kompletnego wektorowego modelu 3D z pomiaru jednego stereogramu. Wspólny przestrzenny układ odniesienia dla wszystkich stereogramów powoduje, że można połączyć wszystkie cząstkowe modele 3D w jeden wspólny model całego obiektu zwany modelem szkieletowym. Dla uzyskania modelu powierzchniowego należy teraz zdefiniować wszystkie powierzchnie obiektu i pokryć je siatkami o różnej gęstości, zależnej od charakteru powierzchni. W kolejnym etapie następuje nałożenie na powierzchnie modelu tekstur, czyli obrazów, które ostatecznie wizualizować będą model 3D. Mogą to być zarówno tekstury sztuczne jak i naturalne. W przypadku tych ostatnich wykorzystuje się zarówno fotoplany jak i ortofotoplany obiektu. Na rysunku 4. pokazane są dwa modele 3D jeden z nałożonymi teksturami sztucznymi a drugi z naturalnymi.

Tak uzyskany model 3D może być oglądany z różnych stron i w dowolnych rzutach, można wykonać film obrazujący szczegóły modelu, wreszcie można z wykorzystaniem języka VRML udostępnić go poprzez internet (Boroń, Dziedzic, 2006).

W wyniku pełnej wektoryzacji wszystkich krawędzi obiektu w autografie można utworzyć wektorową dokumentację 2D, model szkieletowy oraz w procesie ortorektyfikacji ortofotogram obiektu.



Rys. 4. Modele 3D obiektów architektonicznych: a – model kościoła pokryty sztucznymi teksturami, b- fragment modelu absydioli pokryty naturalnymi teksturami fotoplanów

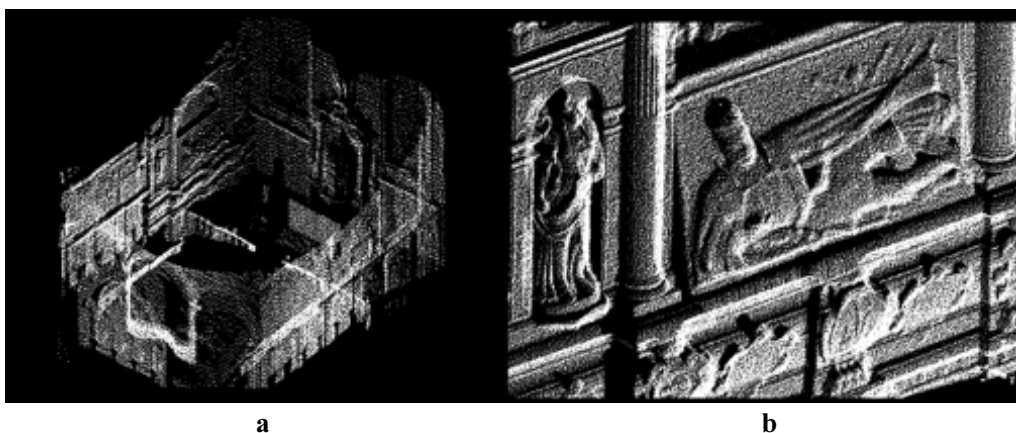
Propozycje nowych produktów inwentaryzacji zabytków

Techniki cyfrowe stwarzają możliwość zaproponowania odbiorcom klasycznej dokumentacji nowych form aktywnej inwentaryzacji, która pozwoli na samodzielnie pozyskiwanie dowolnych danych o obiekcie niekoniecznie znajdujących swoje odzwierciedlenie w wykonanych produktach dokumentacji. Można do tego celu wykorzystać zestrojone modele stereoskopowe, stereogramy w postaci anaglifowej oraz panoramy obiektu.

Zestrojony model 3D, chmura punktów

Zestrojony w autografii cyfrowej model oraz chmura punktów to półprodukty technologii inwentaryzacji fotogrametrycznej i skanowania laserowego. Dopiero pomiar i obróbka cyfrowa tych źródłowych półproduktów pozwala utworzyć właściwą dokumentację. Obecnie narzędzia do ich obróbki (autografy cyfrowe, oprogramowanie typu CAD) choć nie najtańsze są ogólnie dostępne. Dlatego wydaje się celowym proponowanie odbiorcy wykorzystanie tych materiałów do samodzielnego opracowania. Nie ma potrzeby kupowania od razu drogiego oprogramowania, wystarczy od wykonawcy zażyczyć sobie wszystkich pośrednich produktów technologii fotogrametrycznej takich jak zestrojone modele (elementy orientacji zewnętrznej i wewnętrznej zdjęć), zapisane w uniwersalnych formatach numeryczne modele obiektu, surowe pliki wektorowe stereodigitalizacji, oraz wszystkie zdjęcia pomiarowe wykorzystane do opracowania. W przypadku skanowania laserowego będzie to zintegrowana w całość chmura punktów opisująca geometrię obiektu (rys. 5). Takie postępowanie może umożliwić w przyszłości samodzielne pomiary obiektu, może ułatwić wykonanie kolejnych wersji ortofotoplanów (wykorzystanie tego samego modelu obiektu) oraz kameralne pozyskanie osnowy fotogrametrycznej dla kolejnej np. powykonawczej inwentaryzacji.

Poza tym zgromadzenie wszystkich materiałów dotyczących danego obiektu zabytkowego w postaci elektronicznej nie zabiera dużo miejsca (płytki DVD), a stanowi potencjalne źródło danych dla badań porównawczych oraz kolejnych opracowań w późniejszych okresach.



Rys. 5. Chmura punktów opisująca obiekt zabytkowy: a – zintegrowana chmura powstała z połączenia częściowych pomiarów ze wszystkich stanowisk, b – fragment chmury punktów w powiększeniu

Stereogramy i panoramy

Dobrym uzupełnieniem metrycznej dokumentacji obiektu zabytkowego są produkty niemetryczne, pozwalające lepiej wizualnie poznać obiekt. Stereogramy pozwalają uzyskać w naszym umyśle sztuczny efekt przestrzenności obiektu, co znakomicie zwiększa percepcję tego obiektu. Efekt ten wykorzystywany praktycznie w autografii cyfrowej do pomiarów można również wykorzystać tylko do efektu wizualnego. Można tutaj wyróżnić różne techniki jego uzyskania. Najtańszą jest technika anaglifowa, ponieważ można znaleźć bezpłatne

programy do ich tworzenia, a do uzyskania efektu stereoskopowego wystarczają tanie, lekkie okulary anaglifowe. Takie stereogramy można utworzyć z istniejących fotogrametrycznych zdjęć pomiarowych lub specjalnie wykonanych zdjęć cyfrowych. Dodatkowe stereogramy mogą obrazować np. detale obiektu architektonicznego znakomicie uzupełniając wykonaną dokumentację.

Drugim ciekawym, niezależnym produktem są panoramy umożliwiające oglądanie obiektu wokół wybranego punktu – panoramy sferyczne lub wybranej osi – panoramy walcowe. Panoramy wykonuje się zarówno na zewnątrz jak i wewnątrz zabytkowych obiektów architektonicznych. Jest to obecnie bardzo rozwijana technologia, ponieważ w sposób spektakularny umożliwia zwiedzanie obiektów np. poprzez internet. Wykonany z jednego stanowiska ciąg zdjęć o wzajemnym pokryciu podłużnym i poprzecznym umożliwia ich połączenie w jedną całość zwaną panoramą. Interaktywny program pozwala szczegółowo przeglądać te panoramy umożliwiając zmianę skali obrazu oraz zmianę kierunku obserwacji zarówno w poziomie jak i pionie.

Podsumowanie

Dokumentacja w postaci numerycznej lub cyfrowej jest współcześnie obowiązującym standardem w inwentaryzacji zabytków. Metoda fotogrametryczna i metoda skanowania laserowego są porównywalne w zakresie wektorowych produktów dokumentacji lecz różnią się zasadniczo sposobem pozyskiwania danych. W przypadku opracowań jednoobrazowych, gdzie produktem jest fotoplan o dużej rozdzielczości, metoda fotogrametryczna jest bezkonkurencyjna. W przypadku dużych przestrzennie ukształtowanych obiektów metoda skanowania laserowego jest o wiele szybsza od metody fotogrametrycznej zarówno w zakresie prac terenowych jak i kameralnych. Ze względu na czas skanowania wymaga jednak stabilności stanowiska skanera laserowego. Wykonanie skanowania z podnośników i mało stabilnych rusztowań nie jest możliwe, w przeciwieństwie do metody fotogrametrycznej gdzie krótkie czasy otwarcia migawki eliminują ten problem.

Model krawędziowy obiektu wykonuje się łatwiej z wykorzystaniem stereodigitalizacji niż na podstawie chmury punktów, gdzie krawędź jest wyznaczana z przecięcia powierzchni. Z kolei w metodzie skanowania uzyskanie przekrojów pionowych i poziomych oraz rozwinięć powierzchni jest proste i szybkie. Bardzo gęste skanowanie obiektu wraz z rejestrowaną informacją RGB umożliwia wykonanie ortofotoplanów cyfrowych w barwach naturalnych o wystarczającej jakości radiometrycznej i geometrycznej. W przypadku zbyt rzadkiej chmury punktów można na jej podstawie łatwo pozyskać numeryczny model obiektu i następnie ze zdjęć cyfrowych wygenerować ortofotoplan metodą fotogrametryczną. Dysponowanie technologiami fotogrametryczną i skanowania laserowego stwarza potencjalnie najlepsze warunki sporządzenia optymalnej dokumentacji obiektów zabytkowych zarówno pod względem dokładności, jakości jak i kosztów wykonania.

Literatura

- Baranowski P., Czajkowski K., Gładki M., Morysinski T., Rzonca A., Szambelan R., 2005: Polish experience with advanced digital heritage recording methodology, including 3D laser scanning, CAD and GIS application, as the most accurate and flexible response for archeology and conservation needs at Jan III Sobieski's Residence in Wilanów (Warsaw), VI International Congress on Lasers in the Conservation of Artworks, Wiedeń 2005.
- Boehler W., Marbs A., 2002: 3D Scanning Instruments, CIPA-ISPRS Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording, Korfu 2002.
- Boroń A., Borowiec M., Wróbel A., 2004. Kompleksowa, cyfrowa dokumentacja fotogrametryczna wzgórza zamkowego w Rabszynie k. Olkusza. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 14 Warszawa 2004.
- Boroń A., Dziedzic A., 2006: Wirtualna kopia relikwów romańskich z kościoła św. Andrzeja w Krakowie. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 16 Olsztyn 2006.
- Boroń A., Kocierz R., Wróbel A. 2006: Metoda wytwarzania barwnych fotoplanów rozwinięć malowideł z powierzchni kolebkowych z wykorzystaniem kamery fotogrametrycznej i aparatu cyfrowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 16 Olsztyn 2006.
- Iuliano L., Minetola P., 2005: Rapid Manufacturing of Sculptures Replicas: A Comparison between 3D Optical Scanners, CIPA XX International Symposium, Turyn 2005.

Summary

This paper describes the current level of photogrammetric as well as laser scanning technologies used for historic monuments documentation. The digital photogrammetry creates new possibilities at all stages of documentation process: measurement, presentation and storage. Digital recording of common products including: frontal views, horizontal and vertical cross-sections and photomaps offers wider possibilities of use compared to analogue counterparts. Digital technology expanded documentation products choice, now it is possible to develop 3D models of real world object. Besides, intermediate products in the form of oriented digital stereopairs can be made. Digital recording of images allows the use of passive object documentation (it includes only photographs with measured control points).

Along with progress of photogrammetric documentation, there is hardware and software development. Improved density of CCD matrices, and loseless, above 8bit image formats brings about increasing usage of digital cameras. There is also significant development of photogrammetric digital stations

Laser scanning is the most up-to-date technology used in historical monuments documentation. It is based on short interval measurements with the use of laser scanners. Measurement yields dense cloud of points describing the object. Above all, laser scanner can record radiometric information (brightness or colour) in addition to spatial localization. It can be used to produce wide range of products.

dr inż. Adam Boroń
aboron@agh.edu.pl

mgr inż. Antoni Rzonca
doktorant na Wydziale Geodezji Górniczej
i Inżynierii Środowiska AGH
arz@agh.edu.pl

dr inż. Andrzej Wróbel
awrobel@agh.edu.pl