

Edyta Bar, Joanna Fałdrowicz

Dokumentowanie zabytków architektury metodami fotogrametrycznymi i skaningu laserowego

Acta Scientifica Academiae Ostroviensis nr 34, 5-14

2010

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej bazhum.muzhp.pl, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

Edyta Bar
Joanna Faldrowicz

Dokumentowanie zabytków architektury metodami fotogrametrycznymi i skaningu laserowego

1. Wprowadzenie

Fotogrametria jest dziedziną nauk technicznych zajmującą się pozyskiwaniem, przekształcaniem, prezentacją i gromadzeniem informacji ilościowych i jakościowych dotyczących danego terenu lub obiektu na podstawie zdjęć fotogrametrycznych. Od kilku lat w miejsce zdjęć analogowych stosuje się zdjęcia cyfrowe przy pomocy kamer pomiarowych (głównie lotniczych) lub zwykłych aparatów cyfrowych.

W fotogrametrii rejestracja obrazów następuje bez kontaktu fizycznego z obiektem, dlatego pomiarami można objąć elementy trudnodostępne (na przykład z powodu temperatury, wysokiego napięcia lub innych zagrożeń). W łatwy sposób rejestrowana jest duża liczba punktów jednocześnie co jest szczególnie ważne przy badaniach przemieszczeń szybkozmiennych. Powtarzanie i uzupełnianie pomiarów także nie stanowi dużego problemu, gdyż rejestracja obrazów trwa krótko, a większość prac wykonywana jest w warunkach kameralnych co zwiększa dokładność pomiaru. Duże znaczenie ma także to, że zdjęcia są obiektywnym zapisem rzeczywistości, a co za tym idzie nie są obciążone błędami obserwatora i nie da się ich sfałszować. Fotogram zachowuje wartość archiwalną, a opracowanie jest w niewielkim stopniu obciążone czynnikami subiektywnymi.

Od kilku lat coraz częściej wykorzystuje się przy inwentaryzacji zabytków również skanery laserowe bliskiego zasięgu, które wprost określają trzy współrzędne terenowe każdego punktu rejestrowanego na obrazie.

Ta niezwykle różnorodność i uniwersalność dostępnych narzędzi pomiarowych pozwala na budowanie wariantowych technologii. Stosuje się w określonym przypadku taką metodę, która posiada lepsze parametry techniczne lub ekonomiczne [1,2].

2. Fotogrametria w dokumentowaniu zabytków

Do dokumentowania zabytków architektury wykorzystuje się często fotogrametrię naziemną, określaną wtedy jako architektoniczną. Fotogrametria architektoniczna pozwala najlepiej spełniać wysokie wymagania konserwatorów zabytków a zdjęcia spełniają tu podwójną funkcję: podstawowego materiału do opracowania kartometrycznego oraz dokumentu fotograficznego.

Zdjęcia pomiarowe orientuje się tak, aby osie kamer były prostopadłe do umownej pionowej płaszczyzny rzutowania co ułatwia opracowanie planów jako rzutów na określoną płaszczyznę. Dla inwentaryzowanego obiektu przyjmuje się i dokładnie mierzy osnowę główną, która służy do pomiaru stanowisk kamer oraz stanowisk geodezyjnych wykorzystywanych do uzupełniających pomiarów bezpośrednich, a także punktów kontrolnych, które powinny być sygnalizowane w sposób umożliwiający ich usunięcie bez szkody dla obiektu.

Kameralne opracowanie dokumentacji wykonuje się autogrametrycznie. Plany elewacji można wykonywać metodą przetwarzania ortofotoskopowego lub fotomechanicznego, a dokumentację płaskich szczegółów wykonuje się sposobem przetwarzania graficznego. Dzięki fotogrametrii cyfrowej można opracowywać dokumentację obiektu zabytkowego na podstawie archiwalnych zdjęć niemetrycznych.

Fotogrametria naziemna bywa stosowana także do dokumentowania znalezisk archeologicznych i eksponatów muzealnych, stosowane są zarówno techniki analogowe jak i cyfrowe.

Analogowe (klasyczne) formy 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.

Wraz z rozwojem technik komputerowych dokumenty te zaczęto przedstawiać również w postaci numerycznej i cyfrowej, zapisanych w formie plików rastrowych i wektorowych. Techniki cyfrowe umożliwiają wykonanie zarówno planów kreskowych jak i fotoplanów o wyższej rozdzielczości (szczegółowości), ponieważ nie posiadają one ograniczeń związanych ze skalą wydruku.

Korzystanie z cyfrowej formy dokumentacji wymaga od użytkownika dostępu do specjalistycznego oprogramowania. Metody komputerowe, poza zmianą postaci dokumentacji klasycznej, doprowadziły do powstania nowych form dokumentacji, niemożliwych wcześniej do udostępnienia lub wykonania. Dzięki temu możliwe jest stosunkowo łatwe opracowanie przestrzennej prezentacji obiektów, oraz wykorzystania cyfrowych półproduktów fotogrametrycznych, jako źródła metrycznej informacji o obiekcie.

Zdjęcie fotogrametryczne w porównaniu do obrazu, który uzyskalibyśmy w wyniku rzutowania prostopadłego (mapa) posiada 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 obiektu. W zależności od

geometrycznej formy obiektu stosowane są dwie metody opracowań fotogrametrycznych: jednoobrazowa i dwuobrazowa.

W metodzie jednoobrazowej opracowanie wykonuje się na podstawie pojedynczych zdjęć obiektu. Metoda ta może być stosowana jedynie w przypadku, gdy inwentaryzowany obiekt jest płaski. W inwentaryzacji obiektów zabytkowych będą to głównie malowidła na płaskich ścianach oraz nie rozbudowane przestrzenie, płaskie elewacje budynków. Tą metodą można opracować również obiekty wielopłaszczyznowe. W tym przypadku opracowanie końcowe to połączenie opracowań cząstkowych wykonanych niezależnie dla każdej z płaszczyzn obiektu.

W metodzie dwuobrazowej opracowanie wykonuje się na podstawie par zdjęć stereoskopowych. Metoda stosowana jest podczas inwentaryzacji obiektów rozbudowanych przestrzennie. Położenie wyznaczonych punktów określa się wówczas za pomocą wcięcia w przód, co umożliwia usunięcie wpływu odchyłek radialnych homologicznych punktów obu zdjęć na dokładność wynikową. 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. Metoda dwuobrazowa wykorzystywana jest również przy wykonywaniu rozwinięć malowideł umieszczonych na powierzchniach rozwijalnych (np. sklepienia belkowe) oraz odwzorowań malowideł z powierzchni nierozwijalnych (np. sfera) [1,3].

Można wymienić następujące etapy procesu inwentaryzacji fotogrametrycznej obiektu zabytkowego:

- Założenie i pomiar osnowy geodezyjnej i fotogrametrycznej;
- Wykonanie zdjęć pomiarowych;
- Wstępne prace kameralne;
- Opracowanie dokumentacji cyfrowej;
- Wydruki i archiwizacja dokumentacji cyfrowej [3].

3. Skaniny laserowy jako nowa technika dokumentowania zabytków

W ostatnich latach często wykorzystuje się przy inwentaryzacji zabytków skanery laserowe, które wprost określają trzy współrzędne terenowe każdego punktu rejestrowanego na obrazie. Rejestrowane elementy wektorowe tworzą tzw. chmurę punktów lub trójkąty w postaci sieci nieregularnej (TIN). Skanery laserowe to przyrządy do pomiaru bezpośredniego. Na uzyskany wynik wpływają 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

(całe budowle lub ich zespoły) jak również obiekty w skali mikro (monety, biżuteria). Oprócz pomiaru położenia, w niektórych skanerach istnieje możliwość rejestracji odcienia szarości lub koloru i przypisywania go właściwemu punktowi chmury.

Podstawowym wymaganiem związanym z pozyskiwaniem danych jest absolutna stabilność instrumentu podczas wykonywania pomiaru oraz nieruchomość obiektu pomiaru. Fakt ten sprawia, że możliwość zastosowania skaningu jest ograniczona.

Lasery skanery naziemne dzielą się na skanery typu LIDAR oraz skanery optyczne. Te pierwsze stosowane są do większości obiektów, z wyjątkiem skali mikro. Do precyzyjnego pomiaru obiektów w skali mikro oraz małych stosuje się skanery optyczne [3].

4. Przykład jednoczesnego wykorzystania fotogrametrii i skaningu

Fot. Wiesław Karliński



Usytuowany na niewielkim malowniczym wzniesieniu kościół w Michalicach na Opolszczyźnie jest drewnianą, zorientowaną świątynią. Jego bryłę stanowią trzy zasadnicze elementy ustawione wzdłuż osi wschód-zachód: prezbiterium z zakrystią, nawa z kruchtą oraz dobudowana w późniejszym okresie wieża dzwonna. Dawni cieśle użyli do budowy belek sosnowych i lipowych ocynkowanych na końcu. Stosowano prastare techniki konstrukcji zrębowej i tzw. na słupek, w przypadku wieży. Każda z części świątyni ma inny dach - nawę i prezbiterium pokryto stromymi dachami z gontem, wieża zaś pyszni się ozdobnym barokowym hełmem.

Aktualny kościół ufundowano w roku 1614. Na ten okres datowany jest wystrój i wyposażenie kościoła. Wnętrze pokryte jest późnomanierystyczną polichromią - obejmuje ona wszystkie ściany oraz strop prezbiterium, belkę

teczową, portal główny, drzwi wejściowe do kościoła i zakrystii oraz liczne detale. Przez pewien czas kościół był zborem ewangelickim, wówczas polichromię przykryto tynkiem, gdy została odsłonięta okazało się, że dla potrzeb konserwacji malowideł niezbędna jest precyzyjna inwentaryzacja i dokumentacja. Oprócz wystroju, kościół zachował oryginalne wyposażenie: ołtarze, ambonę, stalle i fotele. Oprócz polichromii, konserwacji wymagała cała konstrukcja. Dlatego też konieczne było wykonanie inwentaryzacji architektonicznej obejmującej ściany, dach z więźbą oraz wieżę, a także wyposażenie wnętrza. W związku z powyższym Opolski Wojewódzki Konserwator Zabytków zlecił wykonanie barwnych ortofotoplanów malowideł oraz pełnej dokumentacji architektonicznej. Wobec takiego zlecenia postanowiono zastosować łączoną metodę inwentaryzacji: fotogrametrię i skanowanie co miało gwarantować sprawne i dokładne opracowanie dokumentacji [4].

4.1. Inwentaryzacja polichromii

Technologia zastosowana w przypadku inwentaryzacji malowideł ściennych to typowa technologia fotogrametryczna stosowana w zagadnieniach bliskiego zasięgu. Daną podstawową, wyjściową opracowania ortofotoplanów w Michalicach była wielkość piksela terenowego ustalona na 0.3mm. Zdjęcia zostały wykonane kamerą o ogniskowej 28mm. Parametry kamery oraz wielkość piksela narzuciły bazę podłużną o wartości 0.55m oraz poprzeczną - 0.65m. Odległość fotografowania - 0.85m. Przy całkowitej powierzchni polichromii w przybliżeniu określanej na 300m² ilość zdjęć sięgała 2500. Przed przystąpieniem do fotografowania rozklejono znaczkę osnowy fotogrametrycznej. Następnie pomierzono je z wykorzystaniem tachimetru bezlusterowego Trimble 3305 DR. Jeśli to tylko było możliwe stosowano wycięcia kątowno - liniowe, jednak trudne warunki geometryczne we wnętrzu zmusiły również do pomiaru biegunowego. Każda ze ścian uzyskała własny układ lokalny. Dokładność określenia położenia punktów wyniosła +3mm.

Wszystkie zdjęcia wykonywane były nocami przy oświetleniu lampami halogenowymi o widmie zbliżonym do światła białego. Kamera została skalibrowana kolorystycznie, na tzw. balans bieli i ustawiana na ruchomym rusztowaniu, jej dokładne położenie kontrolowano z ziemi za pomocą przenośnego monitora. Oprócz zdjęć w skali odpowiadającej fotoplanowi wynikowemu, wykonano zdjęcia o 2.5-krotnie mniejszej skali. Posłużyły one później do zagęszczenia osnowy i umożliwiły wyrównanie bloku zdjęć o rozdzielczości terenowej 0.3mm.

Opracowanie kameralne wyników przebiegało w sposób następujący. Najpierw wykonano konwersję obrazów z formatu RAW do formatu TIFF. Następnie usunięto z nich wpływ dystorsji przy pomocy programu

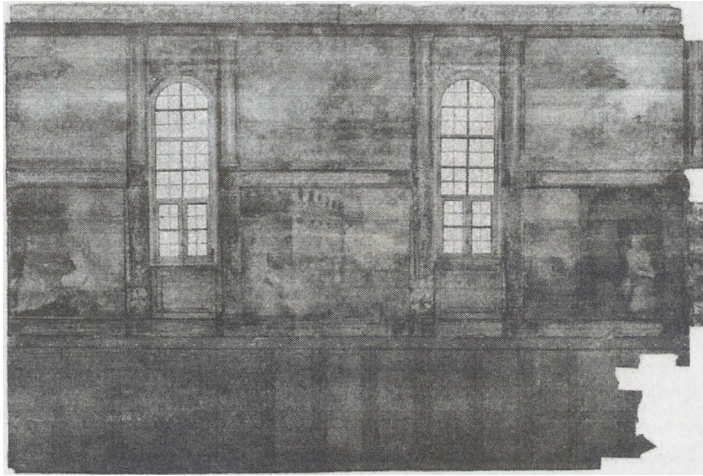
distortion.exe wchodzącego w skład pakietu Dephos. Dane dystorsji pochodziły z wyników kalibracji kamery.

Wówczas przystąpiono do budowy projektów w programie **Dephos Manager**. Każdy projekt dotyczył innego obiektu: poszczególnych ścian, drzwi, belek itd. Wykonano również inwentaryzację detali, które na co dzień nie są widoczne. Przykładem może być polichromia ołtarzowa.

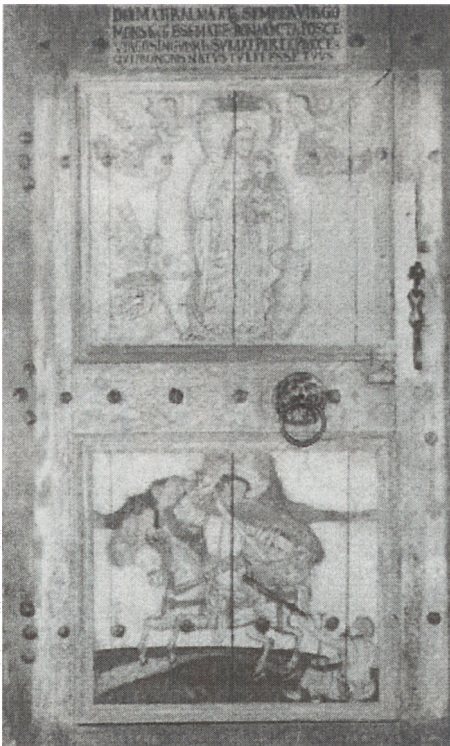
Kolejnym etapem prac było wyrównanie sieci zdjęć przy pomocy programu **External Orientation**. Najpierw wyrównano blok zdjęć małoskalowych i pomierzono fotopunkty służące potem do wyrównania zdjęć o rozdzielczości 0.3mm. Ze względu na wartość historyczną i artystyczną polichromii nie można było zasygnalizować takiej ilości fotopunktów, która wystarczyłaby do orientacji zdjęć 0.3mm. Dlatego zastosowano dwa rzędy zdjęć. Wyrównanie zdjęć małoskalowych posłużyło zagęszczeniu osnowy dla zdjęć w dużej skali, których bloki policzono w oparciu o sygnalizowane punkty kontrolne i te wyznaczone ze zdjęć w małej skali. Ostatecznie odchyłka na punktach kontrolnych bloków w zależności od obiektu wahała się w granicach $\pm 5-10$ mm. Gotowy blok o wyznaczonych elementach orientacji zewnętrznej przekazywany był do pomiaru na cyfrowej stacji fotogrametrycznej **Dephos Mapper**.

Plik wektorowy zawierający linie załamań oraz siatkę punktową będący wynikiem pomiaru 3D w następnej kolejności był stosowany do generowania ortobrazów programem **Dephos Ortho**.

Następnie wszystkie obrazy mozaikowano do postaci gotowego ortofotoplanu. Szczególną uwagę poświęcono zagadnieniu wiernego oddania kolorystyki polichromii. Jak już wcześniej wspomniano zdjęcia wykonywano w nocy przy całkowicie sztucznym oświetleniu specjalnymi żarnikami, stosowano balans bieli, również fotografowano próbnie wzornik kolorów na tle polichromii. Ostatecznie nad wiernością kolorystyczną ortofotoplanów czuwał specjalista do spraw konserwacji malarstwa, który w ostatnim etapie prac decydował o korekcie koloru. Z doświadczenia praktycznego wynika, że technologia cyfrowa może zakłamywać barwy. Inaczej definiuje kolory matryca kamery, inaczej karta graficzna komputera i monitor, a jeszcze inaczej ploter. Dlatego konieczne jest wsparcie specjalistów innych dziedzin, aby produkt był pełnowartościowy nie tylko pod względem geometrycznym (geodezyjnym), ale również kolorystycznym (konserwatorskim). Przykładowe ortofotoplany malowideł ściennych przedstawiają rys.1,2,3 [4].



Rys. 1. Ortofotoplan polichromia ściany bocznej prezbiterium [4].



Rys 2. Ortofotoplan polichromia drzwi do zakrystii [4].

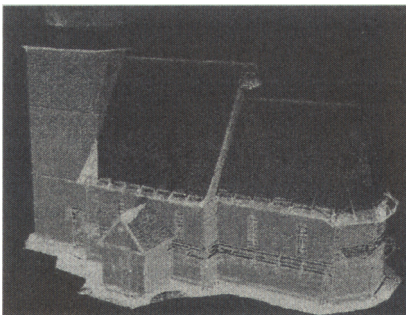


Rys.3 Ortofotoplan polichromia ściany tylnej prezbiterium [4].

4.2. Inwentaryzacja architektoniczna

Inwentaryzacja architektoniczna obejmowała sporządzenie pełnej dokumentacji architektonicznej tj. rzutów, przekrojów oraz widoków elewacji. Całość pomiaru koniecznego do opracowania tych materiałów wykonano skanerem laserowym Callidus CP 3200. Jest to skaner sferyczny o pionowym zakresie pracy 300° . Instrument osiąga rozdzielczość w pionie 0.25° , 0.0625° w poziomie. Dokładność określenia położenia punktu wynosi $\pm 5-10$ mm w zależności od mierzonego materiału. Skaner posiada wbudowaną kamerę, służy ona do zgrubnego rejestrowania obrazu, który pomaga w orientacji i stanowić może materiał wizualizacyjny. Wynikiem pracy skanera jest chmura punktów. Pomiar musi być prowadzony z takiej ilości stanowisk, która umożliwi zminimalizowanie cieni (martwych pól). Chmury te muszą być zorientowane. Położenie skanera jest mierzone biegunowo, oraz wyznaczane są współrzędne reflektora którego położenie jest znajdowane przez skaner podczas inicjacji skanowania. W Michalicach wykonano szereg skanowań wewnątrz i na zewnątrz kościoła, w wieży oraz na poddaszu. Ułatwieniem była okoliczność zbiegnięcia się w czasie skanowania i wymiany części desek poszycia wieży, co pomogło od zewnątrz pomierzyć jej konstrukcję.

W wyniku skanowania i orientacji poszczególnych chmur pochodzących z różnych stanowisk powstała kompletna reprezentacja geometryczna obiektu o dokładności położenia punktu rzędu 10-20mm (rys.4,5). Transformację do wspólnego układu umożliwia moduł **ScanView** programu **Dephos**. Na jej podstawie wykonano wszystkie materiały architektoniczne. Umożliwiają to funkcje **ScanView**, dzięki którym można zawęzać chmurę płaszczyznami. Odpowiedni plaster wycięty z chmury podlega obrysowaniu i w ten sposób powstaje odpowiedni przekrój, czy rzut [4].



Rys. 5. Chmura punktów – widok od prezbiterium [4].



Rys. 6. Chmura punktów – widok perspektywiczny [4].

5. Podsumowanie

Skanowanie oprócz licznych zalet, jak na przykład szybkość pomiaru dużej liczby niedostępnych punktów, posiada wady. Promień lasera rejestrujący punkty obiektu może dostarczać błędnej informacji na skutek ślizgania się lub dodatkowych odbić. Kolejną trudnością jest bardzo precyzyjne wyznaczenie krawędzi na podstawie chmury punktów. Można je jedynie aproksymować, dlatego też im większa gęstość pomiaru, tym dokładniej wyznaczone krawędzie. Jednak tutaj pojawia się inne niebezpieczeństwo. Jeśli punktów jest za dużo, nie da się ich opracować, gdyż dostępne komputery nie są w stanie przetworzyć tak dużej ilości danych.

Podsumowując, wykonanie prawidłowego pomiaru skanerem laserowym wymaga doświadczenia i dobrego projektu. Należy odpowiednio wybrać przyrząd, ponieważ każdy typ posiada cechy, dzięki którym w jednych przypadkach spełnia wymagania, a w innych nie dostarczy odpowiedniego materiału pomiarowego. Dodatkowo trzeba określić położenie stanowisk skanera w celu uniknięcia strat informacji w martwych polach. Skanowanie opiera się na osnowie, która musi posiadać odpowiednie własności dokładnościowe i zostać wyrównana. Jednak stosowanie skanerów posiada wiele zalet i to powoduje, że na świecie coraz powszechniej się ich używa.

Na podstawie doświadczeń firmy Dephos można stanowczo stwierdzić, że wyniki stosowania fotogrametrii razem ze skanowaniem laserowym są obiecujące. Z powodzeniem stosowane są w kolejnych projektach realizowanych przez zespół na terenie całej Polski. Jest to szybka, wydajna technologia. Skaner osiąga olbrzymią sprawność, pomiar setek tysięcy punktów odbywa się w przeciągu sekund.

Warto zwrócić uwagę na fakt, że równoległe stosowanie tych metod daje okazję do kontroli. Dwukrotnie, niezależnie mierzona jest geometria ścian: raz fotogrametrycznie, drugi raz jest skanowana. Należy zakładać, że będzie to już wkrótce obowiązująca technologia.

Wyżej opisana metoda nie jest naturalnie zarezerwowana dla zabytków architektury i malarstwa. Z powodzeniem może być stosowana - co wynika z naszych doświadczeń - do celów inwentaryzacji przemysłowej, budowlanej, infrastruktury transportowej itp. Skala obiektów podlegających rejestracji fotogrametryczno-skaningowej może być mocno zróżnicowana: począwszy od eksponatów muzealnych o rozmiarach kilkunastu centymetrów, a skończywszy na olbrzymich obiektach budowlanych.

Metody fotogrametrii cyfrowej pozwalają na wprowadzanie daleko idących korekt geometrycznych i radiometrycznych w ramach prac kameralnych. Takich korekt nie udawało się dokonywać nawet w najbardziej finezyjnych technologiach analogowych. Warunkiem koniecznym uzyskania produktu końcowego wysokiej klasy, szczególnie fotoplanów, są jednak nadal

dobrze zaplanowane i wykonane zdjęcia, uzbrojone w dobrze zaprojektowaną i pomierzoną osnowę fotogrametryczną [2,4].

Literatura:

1. Bernasik J., *Wykłady z Fotogrametrii*, Kraków 2006
[//home.agh.edu.pl/~zfiit/mat_dydaktyczne_pliki/IB_wyklady.pdf](http://home.agh.edu.pl/~zfiit/mat_dydaktyczne_pliki/IB_wyklady.pdf)
2. Boroń A., Borowiec M., Jachimski J., Wróbel A., *Fotogrametryczna inwentaryzacja zabytkowych murów budowli z czasów starożytnego Egiptu*, Teledetekcja Środowiska z. 33, str. 125-132; Warszawa 2004.
3. Boroń A., Rzonca A., Wróbel A., *Metody fotogrametrii cyfrowej i skanowania laserowego w inwentaryzacji zabytków*, Roczniki geomatyki 2007 Tom 5, Zeszyt 8, Polskie Towarzystwo Informatyki Przestrzennej.
4. Rzonca A., *Współczesne metody kompleksowej inwentaryzacji zabytków na przykładzie parafialnego kościoła w Michalicach*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 14, Białobrzegi - Warszawa 2004.