

Piotr Sawicki

FOTOGRAMETRYCZNE SYSTEMY DO POMIARU PUNKTÓW W BLISKIM ZASIĘGU

Streszczenie. Fotogrametryczne metody pomiaru są nowoczesnym, bezkontaktowym narzędziem pomiaru, kontroli i monitoringu o bardzo szerokim spektrum zastosowań. Współczesne fotogrametryczne systemy pomiarowe bliskiego zasięgu bazują na technice cyfrowej i służą do opracowań punktowych lub rekonstrukcji powierzchni obiektu. Charakteryzuje je uniwersalność zastosowań, zawansowany stopień automatyzacji pomiarów, wysoka dokładność i wiarygodność opracowania.

W pracy omawiane są fotogrametryczne systemy off-line i on-line do pomiaru punktów w bliskim zasięgu. W analizie szczególną uwagę zwrócono na parametry sensorów, tryb działania, sposób opracowania, zastosowanie i dokładność systemów.

1. Wprowadzenie

Optyczne metody pozyskania informacji w paśmie widzialnym, ultrafioletu i podczerwieni promieniowania elektromagnetycznego są efektywnym narzędziem otrzymania aktualnych danych geometrycznych i fizycznych o badanych obiektach. Metody fotogrametryczne, sprzęgnięte z technikami akwizycji i przetwarzania danych cyfrowych, stały się nowoczesnym, nieinwazyjnym sposobem pomiaru, kontroli i monitoringu o bardzo szerokim spektrum zastosowań. Znajdują powszechne zastosowanie w procesie kontroli jakości w przemyśle, w metrologii, w tworzeniu dokumentacji *as-built* infrastruktury przemysłowej i urządzeń technicznych, w robotyce, automatycznym rozpoznawaniu obrazów (widzenie maszynowe), diagnostyce medycznej, inwentaryzacji architektonicznej oraz ostatnio w komputerowym projektowaniu i modelowaniu, w tym również w systemach animacyjnych i wirtualnej rzeczywistości etc.

W nietypowych opracowaniach 3D w bliskim zasięgu skuteczną alternatywą dla pomiarowych metod fotogrametrii cyfrowej staje się skanowanie obiektu laserem lub techniki pomiaru, wykorzystujące teodolity sprzężone z kamerami CCD (*video-theodolites*).

2. Rodzaje fotogrametrycznych systemów pomiarowych

Optyczne systemy pomiarowe składają się z komponentów *hardware*'owych i *software*'owych. W procesie ich projektowania muszą zostać uwzględnione różne czynniki i założenia techniczne, które wpływają na ostateczną jakość i funkcjonalność systemu [Sawicki, Więcek, 1998]. Każdy system charakteryzuje przeznaczenie,

konstrukcja i zasada działania, oprogramowanie oraz szczegółowe parametry techniczne.

Obecny zakres i dokładności fotogrametrycznych metod pomiaru 3D w bliskim zasięgu są wynikiem dynamicznego rozwoju w ostatnich latach optyczno-elektronicznych sensorów obrazowania, techniki komputerowej oraz postępu w technikach akwizycji, przetwarzania, pomiarów obrazów cyfrowych i metodach obliczeń numerycznych. W konsekwencji, nowoczesne wizyjne systemy pomiarowe bazują wyłącznie na technice cyfrowej. Charakteryzuje je uniwersalność zastosowań, zawansowany stopień automatyzacji pomiarów, wysoka dokładność i wiarygodność wyników opracowania.

Ze względu na występowanie różnych konstrukcji i niejednokrotnie wspólnych cech, trudno jest dokonać klasyfikacji systemów w oparciu o jednolite standardy. Fotogrametryczne systemy pomiaru i przetwarzania danych, służące do rekonstrukcji obiektów 3D w bliskim zasięgu, można według autora sklasyfikować uwzględniając następujące kryteria (Tabela 1).

Tabela 1

Klasyfikacja fotogrametrycznych systemów pomiarowych 3D

Kryterium klasyfikacji	Typ systemu	
	Zakres pomiaru	pomiar punktów
Tryb opracowania	off-line	on-line
Sposób opracowania	interaktywny	automatyczny
Zakres rejestracji	monospektralny	wielospektralny
Liczba sensorów	jednosensorowy	multisensoralny
Rodzaj sensorów	homogeniczny	hybrydowy
Konfiguracja sprzętu	przenośny	stacjonarny
Transmisja danych	bezprowadowy	przewodowy
Ilość stanowisk	dwustanowiskowy	wielostanowiskowy
Ilość obrazów	dwuobrazowy	wieloobrazowy

Ze względu na zakres pomiaru można wyróżnić dwa podstawowe typy cyfrowych wizyjnych systemów bliskiego zasięgu. Są to systemy służące do fotogrametrycznego pomiaru punktów (typ 1) oraz pomiaru zewnętrznej, ciągłej powierzchni obiektu (typ 2).

Systemy pierwszego typu przeznaczone są do pozyskania w przestrzeni 3D współrzędnych punktów sygnalizowanych i dyskretnych, które opisują cechy geometryczne badanego obiektu – położenie, kształt, wielkość, deformację, przemieszczenie. Charakterystyczną cechą tych systemów jest sposób pomiarów i rekonstrukcja obiektów oparta na zasadzie triangulacji. Technika wykonania zdjęć cyfrowych, punktowy sposób pomiaru na zdjęciach i stosowane analityczne metody wyznaczenia współrzędnych X,Y,Z punktów odpowiadają klasycznemu przebiegowi

opracowania metodą fotogrametryczną. Ze względu na przeznaczenie, zasięg rejestracji, uzyskiwane dokładności i ilość aplikacji systemy tego typu odgrywają obecnie dominującą rolę w fotogrametrii bliskiego zasięgu. Z tego względu będą one przedmiotem szczegółowej analizy w dalszej części pracy.

Optyczne systemy pomiarowe drugiego typu służą do rekonstrukcji 3D kształtu obiektu i dostarczają informacji o jego cechach. Stosowane są w nich metody: projekcji prążków, interferometrii holograficznej i plamkowej, interferometrii siatkowej. W fotogrametrii bliskiego zasięgu służą do pomiaru zewnętrznej, ciągłej powierzchni obiektów o dowolnych kształtach, dla których nie jest celowa lub nawet możliwa reprezentacja powierzchni za pomocą zbioru punktów sygnalizowanych. Klasyfikacja tych metod, sposób działania i techniki pomiaru przedstawione są w literaturze z zakresu fotogrametrii [Kraus, 1997; Luhmann a, 2000].

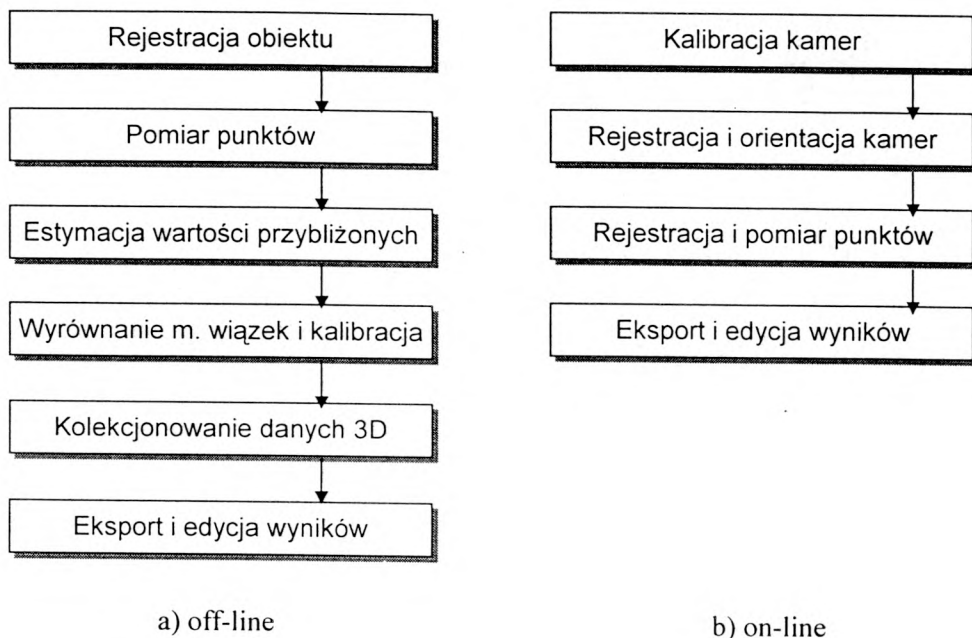
Optyczne metody pomiarowe drugiego typu są jednocześnie podstawowym narzędziem badań w mechanice i inżynierii materiałowej. Zakres pomiarów obejmuje badanie elementów poddanych różnorodnym obciążeniom mechanicznym i termicznym oraz badanie zjawisk mechaniki pękania, zmęczenia materiałów, naprężeń resztkowych etc. Techniki te służą również do analiz lokalnych własności takich materiałów jak: materiały kompozytowe i „inteligentne”, kryształy i polikryształy, połączenia materiałów i mikroelementów, materiałów w pakietach elektronicznych i mikroelementach krzemowych (MEMS, MOEMS). Zastosowaniem optycznych technik pomiarowych w tym zakresie badań zajmuje się inżynieria fotoniczna.

Optyczne systemy fotogrametryczne do pomiaru powierzchni (typ 2) najczęściej stosowane są do kontroli jakości w różnych gałęziach przemysłu, np. do badania karoserii pojazdów, w diagnostyce medycznej, archeologii etc. Praktyczne przykłady rozwiązań i ich zastosowania opisane są w licznych publikacjach [Dold, Maas, 1994; Gäbel, 1993; Kludas, 1995; Krzystek, Petran, 1995; Michaelis, 1996; Riechmann, 1995; Scaioni et al., 1996; Zawieska, 2000].

3. Fotogrametryczne systemy do pomiaru punktów

Fotogrametryczne systemy do pomiaru punktów dzielą się ze względu na tryb przebiegu opracowania na off-line i on-line. Systemy, które działają w trybie off-line (Rys. 1a), realizują pomiar w dwóch podstawowych fazach. Sekwencyjna akwizycja obrazów cyfrowych oraz pomiar punktów obrazowych i analityczne wyznaczenie współrzędnych przestrzennych (X,Y,Z) punktów obiektu następują niezależnie, w różnym czasie. Tryb on-line (Rys. 1b) polega na akwizycji obrazów cyfrowych, pomiarze i wyznaczeniu współrzędnych przestrzennych punktów w jednym cyklu, w bezpośrednim następstwie czasowym.

W zależności od przedmiotu i warunków pomiaru niektóre systemy mogą występować w konfiguracji sprzętowej jako systemy przenośne lub stacjonarne. Przykładem takiego uniwersalnego rozwiązania jest system Imetric, HAZMAP lub V-STARs (Rozdz. 3.2.1 i 3.3.1). Sposób pozyskania obrazów cyfrowych wpływa zasadniczo na architekturę i parametry techniczne systemu.



Rys. 1. Etapy opracowania w fotogrametrycznym systemie off-line i on-line

3.1. Kamery cyfrowe

Fotogrametryczne metody bliskiego zasięgu wykorzystują obecnie do pomiaru obrazy cyfrowe pozyskane w trybie pośredniej lub bezpośredniej akwizycji. Sposób pośredni polega na skanowaniu zdjęć analogowych, wykonanych przeważnie kamerami metrycznymi lub semimetrycznymi. Akwizycję bezpośrednią wykonuje się za pomocą kamer cyfrowych [Luhmann a, 2000]. Współczesne fotogrametryczne systemy pomiarowe bliskiego zasięgu, z nielicznymi wyjątkami – np. system RolleiMetric CDW (Rozdz. 3.2.1), bazują na bezpośrednim sposobie akwizycji obrazów cyfrowych.

Pomiarowe kamery cyfrowe o bardzo wysokiej rozdzielczości matrycy CCD, w których obraz jest sekwencyjnie skanowany, cechuje bardzo długi czas $5 \div 330$ sek. generowania obrazu. Cecha ta stanowi zasadnicze ograniczenie ich powszechnego zastosowania i dotyczy kamer Zeiss – UMK HighSCAN ($15.4K \times 11K$, tryb *Macro-Scan*), Jenoptik – Eyelike ($6.1K \times 6.1K$, *Micro-Scan*), Rollei – RSC ($4.5K \times 4.5K$, *Réseau-Scan*), RJM – JenScan ($4.5K \times 3.1K$, *Micro-Scan*). Kamery z bezpośrednim cyfrowym zapisem posiadają czas akwizycji obrazu ≤ 2 sek., np. Imetric – Icam 28 ($7.2K \times 4.1K$, *CCD digital*) i Kodak – Megaplus 16.8i ($4.1K \times 4.1K$, *CCD digital*).

W kamerach z zapisem cyfrowym o nieco niższej rozdzielczości matrycy CCD, np. Imetric – Icam 6 ($3.1K \times 2K$, *CCD digital*), GSI/Leica – INCA 6.3 ($3.1K \times 2K$, *CCD digital*) czas pozyskania obrazu jest ≤ 0.8 sek.

Nowoczesne kamery cyfrowe typu *still video* są to konstrukcje powstałe na bazie lustrzanek jednoobiektywowych, które wyposażono w stabilny pod względem geometrycznym sensor CCD. W aplikacjach bliskiego zasięgu są powszechnie stosowane kamery o wysokiej rozdzielczości, np. seria Kodak – DCS 460, 465, 760 (3.1K × 2K) lub Fuji – FinePix S1 Pro (3K × 2K) oraz ewentualnie kamery o średniej rozdzielczości, np. Kodak – DCS 420 (1.5K × 1K), Fuji – FinePix 6900 Zoom (2.8K × 2.1K). W kamerach *still video* zapis obrazów cyfrowych w czasie ca 0.5 sek. następuje bezpośrednio na wewnętrznych, wymiennych kartach pamięci typu *CompactFlash* (max 340MB), *Smartmedia* lub dyskach *Microdrives* (1GB). Transfer danych cyfrowych do komputera odbywa się za pomocą interfejsu typu SCSI, USB lub kart PCMCIA.

Aparaty cyfrowe *still video* stosowane w fotografii amatorskiej posiadają konstrukcję typu *compact* i dysponują obecnie maksymalną rozdzielczością rzędu 2.7K × 2K. Ich ograniczone zastosowanie w fotogrametrii związane jest z mniejszą rozdzielczością sensorów CCD i brakiem dostatecznej stabilności wszystkich parametrów kalibracji. Traktowane są jako kamery niemetryczne i używane do pomiaru obiektów o niewielkich wymiarach, np. maszyny, urządzenia techniczne, obiekty i detale architektoniczne etc. (IAPRS, 1996; IAPRS, 2000), względnie przy założonej mniejszej dokładności opracowania.

Cyfrowe kamery video CCD charakteryzuje zdecydowanie niższa rozdzielczość. Kamery do aplikacji technicznych, np. typu *CCTV* – Panasonic WV-BP322 ma rozdzielczość 0.75K × 0.58K, natomiast Pulnix TM 1300 – rozdzielczość 1.3K × 1.K. Digitalizacja sygnału i jego transfer wymaga z reguły stałego sprzężenia ze specjalną kartą sterującą *frame grabber* i *host* komputerem. Kategoria użytkowych kamer video typu *camcoder* oferuje maksymalną rozdzielczość 1.9K × 1K. Cyfrowe kamery video CCD wykorzystywane są w stacjonarnych fotogrametrycznych systemach typu 1 oraz typu 2. Stosowane są z powodzeniem w systemach on-line do pomiarów w czasie rzeczywistym szybkozmiennych procesów kinematycznych, do kontroli jakości produktów przemysłowych, w diagnostyce medycznej, etc. Ze względu na niską rozdzielczość mają ograniczony zasięg rejestracji, maksymalnie do kilku metrów. Dla systemów opartych na tym typie kamer względną dokładność pomiaru szacuje się na 1: 3 000 ÷ 1: 15 000 odległości rejestracji.

3.2. Systemy fotogrametryczne typu off-line

Typowy system off-line składa się z przynajmniej jednej wysokorozdzielczej kamery cyfrowej typu *still video* oraz przenośnego komputera typu *notebook*. Systemy te akceptują import zeskanowanych zdjęć analogowych (negatywy, odbitki stykowe), wykonanych przede wszystkim kamerami metrycznymi lub semimetrycznymi z siatką *Réseau*, które zapisano w plikach o typowych formatach. Obiektowe oprogramowanie – systemowe i narzędziowe, są aplikacjami, które pracują w środowisku Windows i są obsługiwane przez rozbudowany interfejs użytkownika. Standardem jest integracja wyników opracowania 3D ze środowiskiem systemów CAD.

Opracowanie w systemie off-line (Rys. 1a) przebiega w następujących zasadniczych etapach:

1. Rejestracja obiektu

Obiekt rejestrowany jest za pomocą kamery cyfrowej na minimum dwóch obrazach cyfrowych (przeciętna ilość zdjęć wynosi $10 \div 50$). Należy przy tym spełnić optymalne warunki dla konfiguracji geometrycznej sieci przestrzennej zdjęć, które dotyczą przede wszystkim kąta przecięcia promieni rzutujących, stosunku bazowego, pełnego wykorzystania formatu obrazu, wielokrotnej rejestracji tych samych punktów na różnych obrazach.

2. Pomiar punktów

Kodowany system numeracji punktów (kod kreskowy, kod pierścieniowy, kod kropkowy) [Bösemann, Sinnreich, 1994; Niederöst, Maas, 1997; Sung, Schultes, 1997] umożliwia jednoznaczny identyfikację punktów na obrazach cyfrowych oraz automatyczny tryb pomiaru punktów i orientacji zewnętrznej zdjęć. Sygnalizowane punkty pomiarowe (*target*) w kształcie koła o wielkości przynajmniej 5 pikseli w skali obrazu, powinny posiadać jasną odbłaskową strukturę powierzchni. Każdy punkt obiektu powinien zostać zarejestrowany na $5 \div 20$ obrazach cyfrowych. Automatyczny pomiar współrzędnych pikselowych wykonywany jest najczęściej metodą LSM (*Least Squares Matching*). Przy pomiarze punktów sygnalizowanych, pod warunkiem dokładnie zdefiniowanego obrazu referencyjnego, uzyskuje się bardzo wysokie dokładności rzędu $0.02 \div 0.05$ wymiaru piksela. Punkty naturalne oraz punkty, których pierwotny kształt jest na obrazie zdeformowany, warunkowo mierzy się manualnie, z podpikselową dokładnością. Należy zastosować przy tym powiększenie obrazu cyfrowego i interpolację bilinearną lub bikubiczną.

3. Estymacja wartości przybliżonych

Punkty kodowane, które są automatycznie wyszukane i pomierzone na wszystkich zarejestrowanych obrazach, automatyzują proces estymacji przybliżonych wartości elementów orientacji zewnętrznej zdjęć oraz współrzędnych punktów obiektu. Zdjęcia, na których zidentyfikowano fotopunkty lub obiekt referencyjny (*autobar*) z punktami w lokalnym 3D układzie współrzędnych, mają wyznaczone bezpośrednio elementy orientacji przestrzennej metodą wcięcia wstecz. Pozostałe zdjęcia z kodowanymi punktami, tworząc kolejne modele, są wzajemnie orientowane w stosunku do układu modelu początkowego. Przybliżone współrzędne 3D punktów kodowanych są wyznaczone metodą wcięcia w przód. Następnie realizowane jest wstępne wyrównanie metodą wiązek, które poprawia przybliżone wartości wyznaczanych parametrów orientacji zewnętrznej zdjęć i współrzędnych punktów. Orientacja pozostałych zdjęć wyznaczana jest iteracyjnie przez kolejno po sobie następujące wcięcia wstecz i wyrównanie metodą wiązek. Punkty sygnalizowane, niekodowane są identyfikowane, numerowane i automatycznie mierzone na wygenerowanych obrazach epipolarnych. W przypadku braku punktów kodowanych stosowane jest kombinowane fotogrametryczne wcięcie w przód i wstecz [Kraus, 1997; PICTRAN B/D/E, 2000] lub inne iteracyjne strategie obliczeniowe [Hinsken, 1987; Luhmann a, 2000].

4. Wyrównanie metodą wiązek łącznie z kalibracją polową kamery

Standardowe wyrównanie metodą wiązek sieci zdjęć cyfrowych stanowi kombinowane wyrównanie obserwacji fotogrametrycznych i geodezyjnych. Wyznacza elementy orientacji przestrzennej zdjęć i współrzędne X, Y, Z punktów obiektu. W przypadku niedostatecznej dokładności wyznaczenia fotopunktów i innych obserwacji geodezyjnych lub ich braku stosuje się technikę swobodnego wyrównania sieci. Przy korzystnej konfiguracji zdjęć i dobrym uwarunkowaniu układu równań możliwe jest również jednoczesne określenie parametrów kalibracji kamery. Opcjonalna kalibracja zawiera wyznaczenie podstawowych elementów orientacji wewnętrznej c_K, x'_0, y'_0 kamery oraz dodatkowe parametry, które opisują błędy systematyczne obrazu. Ocena wyników wyrównania przeprowadza się na podstawie analizy błędów i kryteriów dokładności. Typowa analiza obejmuje odchylenie standardowe $\Sigma 0$, parametry wewnętrznej i zewnętrznej dokładności, parametry wewnętrznej i zewnętrznej wiarygodności. Szczególnie ważny jest test wykrywania i eliminacji błędów grubych obserwacji fotogrametrycznych, które spowodowane są najczęściej błędną identyfikacją punktów lub niedokładnością wyznaczenia punktów homologicznych na obrazach epipolarnych.

5. Kolekcjonowanie danych 3D

Ścisłe wyznaczenie metodą wiązek podstawowego zbioru punktów, opisujących badany obiekt, następuje w etapie 4. Dodatkowe punkty i zdefiniowane obiekty graficzne mogą być określone metodą fotogrametrycznego przestrzennego wcięcia w przód w oparciu o obliczone elementy orientacji zdjęć.

6. Eksport i edycja wyników

Wyznaczone współrzędne punktów obiektu są zapisane w plikach. Zdefiniowane obiekty graficzne (punkty, poligony i płaszczyzny) są wizualizowane na obrazach pomiarowych (funkcja *superimposition*). Z poziomu interfejsu użytkownika możliwy jest eksport plików wynikowych do środowiska 3D systemów CAD. Standardem jest transfer plików w formacie DXF. Umożliwia to sporządzenie kompleksowej graficznej dokumentacji *as-built* i modelowanie 3D obiektu.

Przenośne systemy fotogrametryczne typu off-line cechuje duża uniwersalność zastosowań w bliskim zasięgu. Są szczególnie przydatne przy metrologicznych pomiarach wielkowymiarowych obiektów o złożonej przestrzennej konstrukcji, które w czasie rejestracji nie podlegają zmianom kinematycznym. W takich przypadkach zdjęcia wykonuje się kamerą z wielu swobodnych stanowisk. Typowe zastosowania fotogrametrycznych cyfrowych systemów off-line dotyczą numerycznego opracowania obiektów ze względną dokładnością $ca\ 1: 50\ 000 \div 1: 100\ 000$. Odpowiada to dokładności wyznaczenia położenia punktów $\pm 0.1 \div 0.2\ mm$ dla średniej odległości 10 m rejestracji zdjęć.

3.2.1. Przykłady współczesnych rozwiązań off-line

DPA-Pro [Peipe et al., 1994; Schneider, 1996; DPA, 2002] – przenośny system do pomiarów 3D bazuje na kamerze cyfrowej *still video* Kodak DCS 760 lub BlueCam (1.5 mln pikseli) i komputerze *notebook*. Pomiar obrazów cyfrowych jest w pełni automatyczny. Punkty wyznaczone są przez rozwiązanie metodą wiązek

przestrzennej terratriangulacji z możliwością jednoczesnej kalibracji kamery cyfrowej. Wyniki obliczeń podlegają ocenie statystycznej i analizie dokładności. Dalsze przetwarzanie danych i ekstrakcja informacji geometrycznych możliwe jest w dodatkowym pakiecie AICON 3D Studio. System DPA-*Pro* jest przeznaczony do precyzyjnych pomiarów budowli inżynierskich, maszyn, konstrukcji i urządzeń w przemyśle maszynowym, okrętowym, samolotowym, samochodowym (*crash-testy*) etc.

PHIDIAS [Benning, Schwermann, 1997; PHIDIAS, 2002] – cyfrowy, interaktywny system fotogrametryczny jest aplikacją pracującą w środowisku programu MicroStation. Akceptuje obrazy cyfrowe pochodzące z różnych źródeł. Umożliwia automatyczny pomiar punktów na obrazach cyfrowych. Ścisłe wyrównanie obserwacji realizowane jest metodą wiązek łącznie z wielowariantową kalibracją kamery z zastosowaniem różnych modeli opisujących dystorsję. Uzyskane dane 3D są bezpośrednio integrowane z funkcjami MicroStation. Cecha ta jest szczególnie przydatna przy sporządzaniu graficznej rekonstrukcji obiektów architektonicznych oraz dokumentacji 3D *as-built* infrastruktury przemysłowej. Względna dokładność wyznaczenia punktów szacowana jest na ca 1: 25 000 ÷ 1: 30 000 wymiaru obiektu.

RolleiMetric CDW [Godding, 1996; Gąsior, 1998; CDW, 2002] – rozwiązanie, w którym proponuje się przede wszystkim użycie analogowej kamery RolleiFlex 6008 metric (średnioformatowa lustrzanka z siatką *Réseau*) ewentualnie kamery cyfrowej Rollei-Q16 (4.1K × 4.1K, CCD *digital*). System wyróżnia program PROMPT do rozwiązywania metodą wiązek bloku zdjęć łącznie z kalibracją kamer. W programie zastosowano nowoczesny algorytm wyrównania oparty na metodzie najmniejszych odchyleń absolutnych (zasada *L1-Norm*). Metoda ta daje zadawalające wyniki wyrównania dla słabej konfiguracji geometrycznej zdjęć, nawet przy wystąpieniu 50% obserwacji obciążonych błędami grubymi. System posiada funkcję *superimposition*. Transfer danych do środowiska programów CAD wykonywany jest za pomocą wszystkich standardowych formatów plików wektorowych.

V-STARS/S [Brown, Dold, 1995; V-STARS a b c, 2002] – system, który posiada dwie wersje off-line i on-line. Zastosowano w nim cyfrową kamerę pomiarową GSI/Leica – INCA 6.3 lub INCA 4.2, z wbudowanym specjalnym procesorem do automatycznego rozpoznania i pomiaru punktów sygnalizowanych. Rozwiązanie bloku zdjęć metodą wiązek dostarcza współrzędnych 3D badanego obiektu i statystycznej oceny wyników wyrównania. Przy zastosowaniu pojedynczej kamery oferowana dokładność względna opracowania wynosi ca 1: 100 000 wymiaru obiektu. Tańsza wersja systemu o nazwie V-STARS/E3x, wyposażono w pojedynczą kamerę Nikon D1x (4K × 1.3K), pozwala uzyskać dokładność pomiaru 1: 60 000.

Komersyjne fotogrametryczne systemy off-line, np. Elcovision [Elcovision, 2002], PHAUST [Woytowicz, 1993; PHAUST, 2002] oraz pracujące w tym trybie opcjonalnie – Imetric [Beyer, 1995; Imetric, 2002] i HAZMAP [Chapman et al., 1994; Chapman, Deacon, 1997; HAZMAP, 2002] funkcjonują na podobnych zasadach.

Autorskie rozwiązania, powstałe w celach badawczych, uwzględniają dodatkowo w procesie pomiarów metrologicznych specyficzne warunki, które

wynikają z architektury systemu, np. łączny sposób rejestracji i opracowania cyfrowych obrazów wizyjnych i termalnych w multisensoralnym hybrydowym systemie video-termalnym VISION PLUS [Sawicki, Więcek, 1998; Sawicki, 2000].

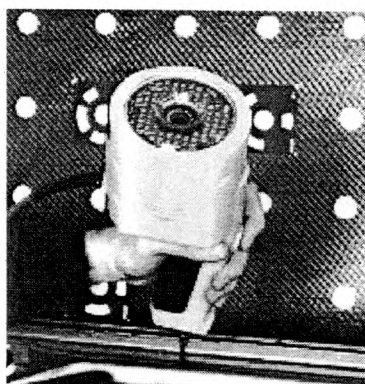
3.3. Systemy fotogrametryczne typu on-line

Typowy system on-line składa się z przynajmniej dwóch kamer cyfrowych o wysokiej rozdzielczości. Każda z kamer połączona jest przewodem z komputerem, do którego w czasie rzeczywistym sekwencyjnie przesyłane i zapisywane są obrazy cyfrowe. Konfiguracja sprzętowa oparta jest zazwyczaj na komputerze typu *notebook*, względnie klasy PC w przypadku stacjonarnego stanowiska pomiarowego. Oprogramowanie systemowe i narzędziowe pracuje w środowisku Windows. System on-line jest zazwyczaj przenośny. Niektóre systemy on-line występują ze względu na określone przeznaczenie tylko w konfiguracji stacjonarnej, np. AICON OLM (Rozdz. 3.3.1).

Integralną częścią systemu jest precyzyjny taster – specjalny wodzik (*manual probe*) (Rys. 2) do stykowego definiowania mierzonych punktów obiektu. Taster posiada co najmniej 3 punkty referencyjne. System wyposażony jest również w skalibrowany wzorec referencyjny – pole testowe. Jest to przenośna, zazwyczaj przestrzenna konstrukcja z sygnalizowanymi punktami o znanych współrzędnych w układzie lokalnym. Kształt i wymiary tastera oraz wzorca referencyjnego dobierane są do geometrycznych warunków opracowania zdjęć.



a) Leica V-STARS/M



b) ACON ProCam

Rys. 2. Taster do pomiaru punktów w fotogrametrycznych systemach on-line

Opracowanie w systemie on-line (Rys. 1b) wykonywane jest w następujących podstawowych etapach:

1. Kalibracja kamer cyfrowych

Konfiguracja zdjęć w warunkach praktycznego zadania z reguły uniemożliwia jednoczesną polową kalibrację kamer. Dlatego elementy orientacji wewnętrznej kamer

muszą zostać wyznaczone wcześniej przy pomocy pola testowego w niezależnym procesie kalibracji laboratoryjnej. Zastosowane kamery cyfrowe muszą charakteryzować się stabilnym zapisem obrazu cyfrowego oraz niezmiennymi w czasie elementami orientacji wewnętrznej, ponieważ określone laboratoryjnie parametry przyjmowane są do właściwego opracowania jako stałe.

2. Rejestracja i orientacja kamer

Wzajemne zorientowanie minimum dwóch lub większej liczby kamer w lokalnym układzie współrzędnych, wykonuje się przez rejestrację wzorca referencyjnego i wykonanie fotogrametrycznego wcięcie wstecz. W celu kontroli i ewentualnie korekcji pierwotnie wyznaczonych elementów orientacji przestrzennej kamer zaleca się wykonanie w całym procesie pomiaru cyklu kolejnych orientacji. Kalibrację połową łącznie z orientacją przestrzenną kamer (etap 1 i 2) można wykonać przy użyciu metody wiązek, jeżeli w trakcie pomiarów zrealizowana zostanie korzystna konfiguracja zdjęć i punktów dostosowania.

3. Rejestracja i pomiar punktów

W praktyce zaleca się synchroniczną wielostanowiskową rejestrację za pomocą kilku kamer. Pozycja tastera rejestrowana jest synchronicznie przez przynajmniej dwie kamery. Punkty pomiarowe definiowane są kolejno przez położenie końca tastera, który operator ustawia manualnie na mierzonej powierzchni. Współrzędne punktów referencyjnych tastera i punktu powierzchni zostają natychmiast wyznaczone w lokalnym układzie współrzędnych metodą fotogrametrycznego wcięcia w przód lub metodą wiązek. Wszystkie kolejne punkty mierzone są w cyklu: wybór punktu, stykowe pozycjonowanie końca tastera na punkcie, rejestracja na obrazach cyfrowych, analityczne wyznaczenie współrzędnych X,Y,Z. Proces wyznaczenia współrzędnych wszystkich punktów kończy transformacja przestrzenna do jednego globalnego układu. Jednoczesna orientacja kamer i pomiar punktów (etap 2 i 3) są możliwe, jeżeli taster i wzorzec referencyjny są zarejestrowane na tych samych zdjęciach w kolejnych sekwencjach pomiarowych. W stacjonarnych systemach on-line, w których w przestrzeni pomiarowej umieszczone jest stałe skalibrowane pole testowe z fotopunktami, etapy 2 i 3 są realizowane zawsze jednocześnie.

4. Eksport i edycja wyników

Kolejne rekordy wyznaczonych współrzędnych punktów zapisywane są w pliku automatycznie. Dane 3D, zawarte w plikach wynikowych, są przesyłane do środowiska CAD oraz poddane dalszej edycji i przetwarzaniu.

Dokładność systemów on-line jest zdecydowanie niższa w porównaniu z systemami typu off-line. Spowodowane jest to następującymi przyczynami:

- punkty pomiarowe zarejestrowane są na mniejszej liczbie obrazów (w typowym przypadku tylko 2 obrazy)
- słaba konfiguracja geometryczna zdjęć powoduje niejednakową dokładność wyznaczenia współrzędnych X,Y,Z
- niedostateczna stabilność elementów orientacji wewnętrznej kamer
- zmiana elementów orientacji zewnętrznej kamer w czasie pomiaru
- niedokładna synchronizacja momentu ekspozycji w kamerach

Typowe zastosowania fotogrametrycznych systemów on-line dotyczą metrologicznych pomiarów urządzeń i elementów konstrukcyjnych w energetyce, przemyśle maszynowym, samochodowym, lotniczym, stoczniowym, w robotyce, etc. ze względną dokładnością ca 1: 20 000 ÷ 1: 50 000. Przy odległości rejestracji ≤ 5 m daje to dokładność wyznaczenia punktów obiektu poniżej ± 0.25 mm.

3.3.1. Przykłady współczesnych rozwiązań on-line

ImetricTI² - PCS [Beyer, 1995; Imetric, 2002] – w wersji on-line wykorzystuje kamery Imetric – Icam 28, Icam 6 o wysokiej rozdzielczości z bezpośrednim zapisem cyfrowym, natomiast w wersji off-line – kamery *still video* serii KODAK DCS. System przeznaczony jest do precyzyjnej kalibracji maszyn i urządzeń oraz automatów i robotów przemysłowych. Dokładność pomiaru przy bardzo bliskiej odległości rejestracji wynosi ca ± 0.05 mm.

Metronor [Metronor, 2002] – system występuje w konfiguracji z jedną lub dwoma kamerami cyfrowymi, które połączone są ze stacją roboczą. Integralną częścią układu pomiarowego jest pióro świetlne (*light pen*) z diodami elektroluminescencyjnymi (LED), których współrzędne przestrzenne są znane w lokalnym układzie przyrządu. Zasięg rejestracji wynosi maksymalnie 16 m. System określany jest jako elektro-optyczna maszyna do pomiaru współrzędnych w aplikacjach metrologicznych. Dokładność pomiarów wynosi $\pm 0.02 \div 0.1$ mm.

ProCam [Schneider, Bösemann, 2000; ProCam, 2002] – system, który bazuje na komputerze *notebook*, może funkcjonować w wersji przenośnej lub stacjonarnej. Aktywny, samorientujący się taster (Rys. 2b) wyposażony jest w 3 mikro kamery CCD i wymienne końcówki o różnej długości i kształcie. W czasie pomiaru mikro kamery muszą być zwrócone na dowolnie konfigurowane panele z kodowanymi fotopunktami. System posiada interfejs do programu CAD, dzięki czemu możliwy jest szybki transfer wyników i porównanie ich z danymi projektowymi. Zakres zastosowań obejmuje pomiary konstrukcji stalowych, budowlanych, urządzeń, odkształceń podczas *crash*-testów etc. Względna dokładność szacowana jest na 1: 20 000 odległości rejestracji.

V-STARs/M [Dold J., Peipe J., 1996; V-STARs a b c, 2002] – system w opcji on-line wykorzystuje sprzęgnięte z komputerem dwie kamery pomiarowe GSI/Leica – INCA 6.3 lub INCA 4.2. Do pomiaru stosowane są różnego kształtu tastery (Rys. 2a) z punktami referencyjnymi i odbłaskowe, kodowane punkty sygnalizowane. Do zdefiniowania mierzonej powierzchni można zastosować projektor światła strukturalnego – PRO SPOT, rzutujący na obiekt 5600 plamek świetlnych. System posiada własny program SOLIDS do analiz graficznych oraz interfejsy do innych programów służących do zaawansowanych analiz CAD. System stosowany jest przez największe światowe firmy z przemysłu motoryzacyjnego i lotniczego. Dokładność względna pomiaru wynosi ca 1: 50 000 wymiaru obiektu.

Do pomiarów określonego typu obiektów skonstruowano specjalne systemy on-line. Do kalibracji automatów i robotów przemysłowych służy metrologiczny

system CAROS⁺ [Godding, Lehmann, 1997], składający się z dwóch kamer o wysokiej rozdzielczości Rollei RSC. Gwarantowana dokładność jest ≤ 0.1 mm w przestrzeni pomiarowej o wymiarach ca $3 \times 3 \times 3$ m³.

Pod względem sposobu rejestracji odrębną grupę tworzą systemy on-line oparte na cyfrowych kamerach video CCD. Cechuje je stacjonarna, przewodowa konfiguracja i wysoki stopień automatyzacji. Do tych rozwiązań należy np. AICON OLM [Bösemann, 1996] – stacjonarny system do kontroli jakości przewodów hamulcowych. Kolejnym przykładem jest stacjonarny system opracowany w ramach projektu DIGIMAN [Bösemann et al., 2000], który bazuje na czterech sprzężonych kamerach video CCD Pulnix TM i zorientowany jest na badanie elementów tłoczonych z blachy, np. części karoserii samochodowych, z dokładnością rzędu $1: 20\ 000 \div 1: 50\ 000$.

4. Podsumowanie

Optyczne metody pomiarów są efektywną techniką pozyskiwania informacji geometrycznych 3D i fizycznych o obiektach w procesie kontroli jakości w różnych gałęziach przemysłu, w badaniach metrologicznych, pomiarach inżynierskich, tworzeniu dokumentacji *as-built* infrastruktury technicznej etc. oraz współcześnie na etapie komputerowego projektowania i modelowania. Dynamiczny rozwój w ostatnich latach fotogrametrii bliskiego zasięgu, i w konsekwencji powstanie wielu cyfrowych systemów pomiarowych, jest efektem wyraźnego wzrostu rozdzielczości kamer cyfrowych przy jednoczesnym spadku ich cen oraz skutkiem dużego zapotrzebowania w różnych dziedzinach techniki na nowe nieinwazyjne metody pomiaru. Intensywny rozwój obserwuje się przede wszystkim w zakresie konstrukcji nowych fotogrametrycznych systemów pomiarowych do punktowych opracowań 3D w aplikacjach metrologicznych.

Współcześnie stosowane rozwiązania są określane jako maszyny do pomiaru współrzędnych 3D w układzie kartezyjskim (*CMM – Coordinate Measuring Machines*). Znaczenie rozwoju fotogrametrycznych systemów pomiarowych off-line i on-line, systemów cyfrowego zobrazowania oraz nowych rozwiązań w metrologii i robotyce podkreśliła pierwsza grupa robocza WG V/1 Komisji V ISPRS (*Automation for Vision Metrology Systems and Industrial Applications*) [ISPRS, 2002], przyjmując ten obszar badań jako podstawowe zadanie do realizacji w latach 2000–2004. Jednym z kolejnych zadań w tej grupie roboczej jest rozwijanie interdyscyplinarnej współpracy z międzynarodową organizacją zajmującą się metodami dokładnego pomiaru współrzędnych w badaniach metrologicznych – *Coordinate Measurement Systems Committee*. Intensyfikowane są też badania nad określeniem nowych standardów odbioru i weryfikacji działania systemów oraz opracowaniem zakresu oceny i testów dokładności [Luhmann b, 2000].

Literatura:

- Benning W., Schwermann R., 1997. PHIDIAS-MS – Eine digitale Photogrammetrieapplikation unter MicroStation für Nahbereichsanwendungen. Allgemeine Vermessungsnachrichten, Nr 1, s. 16-25.
- Beyer H.A., 1995. Digital photogrammetry in industrial applications. IAPRS, Vol. XXX, 5W1, s. 373-378.
- Brown J., Dold J., 1995. V-STARs - a system for digital industrial photogrammetry. Optical 3-D Measurements Techniques III. Wichman Verlag, Heilderbeg, s. 12-21.
- Bösemann W., Sinnreich K., 1994. Vollautomatische Punktsuche und Punkterkennung im digitalen Bild. Publikationen der DGPF, Berlin, s. 215-219.
Bösemann W., 1996. The optical tube measurement system OLM – Photogrammetric methods used for industrial automation and process control. IAPRS, Vol. XXXI, B5, s. 55-58.
- Bösemann W., Godding R., Huette H. 2000. Photogrammetric measurement techniques for quality control in sheet metal forming. IAPRS, Vol. XXXIII, B5/1, s. 291-298.
- CDW, 2002. <http://www.rolleimetric.de>
- Chapman D., Deacon A., Hamid A., 1994. HAZMAP: A Remote digital measurement system for work in hazardous environment. The Photogrammetric Record, 14(83), s. 747-758.
- D., Deacon A., 1997. The role of spatially indexed image archives for as-built modelling of large process plant facilities. Optical 3-D Measurements Techniques IV. Wichman Verlag, Heilderbeg, s. 475-482.
- Dold J., Maas H.G., 1994. An application of epipolar line intersection in a hybrid close range photogrammetric system. IAPRS, Vol. XXX, B5, s. 65-70.
- Dold J., Peipe J., 1996. High resolution data acquisition to observe moving objects. IAPRS, Vol. XXXI, B5, s. 471-474.
- DPA, 2002. <http://www.aicon.de>
- Elcovision, 2002. <http://www.elcovision.com>
- Gäbel H., 1993. Photogrammetrische Verfahren zur Erfassung von menschlichen Körperoberflächen. DGK Reihe C, Nr 405.
- Gąsior D., 1998. RolleiMetric CDW – cyfrowy system fotogrametrii bliskiego zasięgu. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 8, s.14/1-14/9.
- Godding R., 1996. Neue Lösungen in der Nahbereichsphotogrammetrie durch die Kombination digitaler Systeme und moderner Auswerteverfahren. Publikationen der DGPF, Berlin, s. 261-269.

- Godding R., Lehmann M., 1997. Robot adjustment and 3D calibration – photogrammetric quality control on daily use. *Optical 3-D Measurements Techniques IV*. Wichman Verlag, Heilderberg, s. 158-165.
- HAZMAP, 2002. <http://www.absl.co.uk>
- Hinsken L., 1987. Algorithmen zur Beschaffung von Näherungswerten für die Orientierung von beliebig im Raum angeordneten Strahlenbündeln. *DGK Reihe C*, Nr 333.
- Imetric, 2002. <http://www.imetric.com>
- International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 1996. Vol. XXXI, B5.
- International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 2000. Vol. XXXIII, B5/1, B5/2.
- ISPRS, 2002. <http://www.isprs.org>
- Luhmann T. a, 2000. *Nahbereichsphotogrammetrie*. Wichman Verlag, Heilderberg.
- Luhmann T. b, 2000. Recommendations for an acceptance and verification test of optical 3-D measurement systems. *IAPRS*, Vol. XXXIII, B5/2, s. 493-500.
- Kludas T., 1995. Three-dimensional surface reconstruction with the ZEISS photogrammetric measurement system InduSURF Digital. *IAPRS*, Vol. XXX, 5W1, s. 285-291.
- Kraus K., 1997. *Photogrammetry*. Dümmler, Bonn.
- Krzystek P., Petran F., 1995. Automatic reconstruction of concept models by using digital photogrammetric measurement system. *IAPRS*, Vol. XXX, 5W1, s. 176-185.
- Metronor, 2002. <http://www.metronor.com>
- Michaelis M., 1996. Kombination von Photogrammetrie und Streifenprojektion zur Vermessung grosser Objekte. *IAPRS*, Vol. XXXI, B5, s. 357-361.
- Niederöst M., Maas H.G., 1997. Enturf und Erkennung von codierten Zielmarken. *Publikationen der DGPF*, Oldenburg, s. 167-173.
- Peipe J., Schneider C.T., Sinnreich K., 1994. Performance of a PC based digital photogrammetric station. *IAPRS*, Vol. XXX, B5, s. 304-309.
- PHAUST, 2002. <http://www.invers-essen.de>
- PHIDIAS, 2002. <http://www.gia.rwth-aachen.de>
- PICTRAN, 2002. <http://www.technet-gmbh.de>
- PICTRAN B/D/E, 2000. *Opis programu i instrukcja obsługi*. Berlin/Stuttgart.
- ProCam, 2002. <http://www.aicon.de>
- Riechmann W., 1995. Fast object recording by means of structured light and photogrammetric techniques. *IAPRS*, Vol. XXX, 5W1, s. 195-200.
- Sawicki P., Więcek B., 1998. Cyfrowy system video termalny dla aplikacji w bliskim zasięgu. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 8, s.13/1-13/8.

- Sawicki P., 2000. Digital multisensoral video-thermal system for close range metrology applications. IAPRS, Vol. XXXIII, B5/2, s. 691-698.
- Scaioni M., Vassena G., Kludas T., Pfeil J.U., 1996. Automatic DEM Generation using digital system InduSCAN: An application to the artworks of Milano Cathedral finalized to realize phisical marble copies. IAPRS, Vol. XXXI, B5, s. 581-586.
- Schneider C.T., 1996. DPA Win – A PC based Digital Photogrammetric Station for fast and flexible on-site measurement. IAPRS, Vol. XXXI, B5, s.530-533.
- Schneider C.T., Bösemann W., 2000. A new approach to on-line 3D measurement. IAPRS, Vol. XXXIII, B5/2, s. 707-712.
- Sung J.A., Schultes M., 1997. A new circular coded target for the automation of photogrammetric 3D-surface measurements. Optical 3-D Measurements Techniques IV. Wichman Verlag, Heilderbeg, s. 225-234.
- V-STARs a, 2002. <http://www.leica-geosystems.com>
- V-STARs b, 2002. <http://www.geodetic.com>
- V-STARs c, 2002. <http://www.sli.unimelb.edu.au>
- Woytowicz D., 1993. PHAUST – A photogrammetric evaluation system for digital images. Optical 3-D Measurements Techniques II. Wichman Verlag, Karlsruhe, s. 81-87.
- Zawieska D., 2000. Topography of surface and spinal deformity. IAPRS, Vol. XXXIII, B5/2, s. 937-942.

Recenzował: dr inż. Ryszard Preuss