

Możliwości wykorzystania obrazów fotograficznych i cyfrowych w przemysłowej metrologii*

Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH

Józef Jachimski, Władysław Mierzwa, Adam Boroń, Regina Tokarczyk, Andrzej Wróbel

1. Wstęp

Pomiary kształtu obiektów przemysłowych wymagają wysokiej precyzji, a przy tym muszą być na ogół wykonywane w krótkim czasie, aby nie hamować procesów produkcyjnych. Klasyczna fotogrametria od lat święci tryumfy na polu pomiaru odkształceń i przemieszczeń wysokich kominów przemysłowych (Bernasik, 1996), chłodni hiperboloidalnych [Mierzwa, 1995], w przemyśle samolotowym, samochodowym czy stoczniowym [Szczechowski, 1991], a nawet na polu badania kształtu i erozji zboczy bardzo dużych skarp w kopalniach odkrywkowych [Jachimski, 1959].

Pomimo, że ciężkie kamery fotogrametryczne nie są wygodne w użyciu to jednak rozwiązania typowe dla klasycznej fotogrametrii analogowej są często zadowalające z punktu widzenia szybkości wykonania prac terenowych. Uzyskiwane dokładności wyników inwentaryzacji są również wystarczające. Niestety klasyczna fotogrametria jest czasochłonna w zakresie prac kameralnych, które wykazują oporność na automatyzację. Wąskim gardłem jest tutaj proces fotochemiczny i „ręczny” pomiar punktów na zdjęciach.

Duże zainteresowanie stoczniowców możliwościami precyzyjnego wymiarowania elementów konstrukcji statków przed ich połączeniem, stwarza konieczność opracowania takiej wysokodokładnej technologii pomiarowej, która będzie satysfakcjonująca z punktu widzenia łatwości prowadzenia prac terenowych i automatyzacji prac kameralnych.

Dużą nadzieję stwarza tutaj fotogrametria cyfrowa. Obecnie obrazy cyfrowe można pozyskiwać na drodze skanowania zdjęć fotograficznych, lub wprost na drodze elektronicznej przez zapis obrazów rastrowych za pomocą sensorów CCD. Jeśli obrazy cyfrowe zostaną pozyskane wprost z wykorzystaniem opto-elektronicznych sensorów, to możliwe staje się przetwarzanie tych obrazów w trybie on-line, nawet w czasie rzeczywistym. Umożliwia to wiele obiecujących zastosowań fotogrametrii cyfrowej bliskiego zasięgu, takich jak: przemysłowa kontrola jakości, robotyka, nawigacja, transport, medycyna, biomechanika, pomiary inżynierskie, architektura i CAAD itp. Fotogrametria cyfrowa pozwala na automatyzację wykony-

* Opracowano w ramach badań statutowych, temat 11.150.47

wania szeregu zadań pomiarowych jak: rozpoznawanie zmian, wysokodokładne wymiarowanie, śledzenie drogi obiektu, samoorientacja, określanie położenia sensora, rekonstrukcja powierzchni, opisanie sceny i rozpoznanie obiektu, wizualizacja informacji. Rozwiązania te cechuje: bezpośrednie pozyskiwanie obrazów, względnie mały format rejestrowanych obrazów (<4000*2 pixeli na obraz, przy wymiarach płytki CCD rzędu kilku mm), wymaganie semi- albo w pełni automatycznego przetwarzania (opracowania) w czasie rzeczywistym albo co najmniej on-line, interfejs do systemu CAD/CAAD.

2. Pełna i częściowa automatyzacja procesu opracowania

Zadanie fotogrametrycznego albo wizyjnego opracowania danych polega na zamienieniu reprezentacji ikonograficznej danego obiektu (obraz rastrowy, niestrukturalna informacja), na reprezentację symboliczną (wektorowe dane i atrybuty w formie strukturalnej).

Klasyczne podejście polega na rozpoznaniu szczegółów na pojedynczym obrazie, prowadzącym do automatycznego określenia współrzędnych obrazowych tych szczegółów; badania prowadzone w AGH wykazały możliwość uzyskania dokładności rzędu 1/20 piksela przy wykorzystaniu własnej procedury. Rozpoznanie szczegółów wykonywane jest oddzielnie na każdym obrazie, a w celu ustalenia odpowiedniości obrazów określonego szczegółu na szeregu zdjęć musi być zastosowany "generator odpowiedniości", np. algorytm dopasowywania obrazu lub wzorca, albo algorytm przecięcia promieni rdzennych. Wprowadzono również rozwiązania wieloobrazowe, które wykorzystują równocześnie szereg obrazów tego samego obiektu.

Istnieje też bardzo ogólna wersja metody automatycznego pomiaru opartego na identyfikacji obrazów przez porównanie z wzorcem, z wykorzystaniem wyrównania metodą najmniejszych kwadratów. Wytwarza ona równocześnie pełny model cyfrowy powierzchni i korespondujących wartości jasności pikseli dla ortofotografii.

Fotogrametria bliskiego zasięgu najczęściej ma do czynienia z problemem przypisywania współrzędnych XYZ przestrzeni obiektu wybranym punktom tego obiektu. Punkty te mogą być wskazane sztuczną tarczą sygnalizacyjną (często stosowane są tarcze odbłaskowe), przez rzutowany obraz świetlny sygnału w spójnym lub nie spójnym promieniowaniu, albo przez naturalne szczegóły obiektu. Wyznaczane współrzędne są odnoszone do środków tarcz, (często okręgów), do narożników, różnego typu złączeń, albo do środków ciężkości detali o nieregularnym kształcie. Zadanie to obejmuje wiele czynności poczynając od kalibracji kamery po wyznaczenie pojedynczego punktu lub obiektu wielopunktowego, określenie pozycji i orientacji sensora, rekonstrukcję powierzchni albo generowanie zbioru punktów. Najczęściej

stosowane jest określanie współrzędnych punktu obrazu lub piksela przez wyznaczenie środka ciężkości lub identyfikację obrazu sygnału przez porównanie z wzorcem (z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów). Jeśli obrazy pozyskiwane są z wykorzystaniem kamery cyfrowej wyposażonej w synchroniczne przekazywanie pikseli z kamery do pamięci cyfrowej, to można uzyskać powtarzalność rejestracji w granicach ± 0.004 piksela w kierunku x i y [Beyer 1992].

Dysponując punktami dobrze zdefiniowanymi, pokrywając obiekt mocną siecią zdjęć, stosując wyrafinowaną metodę samokalibracji z wyrównaniem wiązek, modelując wszystkie błędy systematyczne, otrzymujemy dla kamery CCD typowego formatu (728*568 pikseli) dokładność metody rzędu 0.02 piksela w przestrzeni obrazowej oraz dokładność wyznaczenia głębokości lepszą niż 1:10 000 przeciętnej odległości sensora od obiektu. Dokładność tę wyznacza się na punktach kontrolowanych. Zakładając, że obrazy pokrywają cały obiekt, ta dokładność odpowiada względnej dokładności pomiaru obiektu rzędu 1:50 000. Przy zastosowaniu wielkoformatowych kamer CCD i semi-automatycznego pomiaru obrazu można uzyskać dokładności względne na poziomie 1:1 000 000 [Fraser, 1992a]. Należy uznać, że te wartości określają granice, na które pozwala współczesna technologia.

Jeden z wcześniejszych problemów - automatyczne przyporządkowanie obrazów w gęstym polu tarcz sygnałowych - obecnie może być dobrze rozwiązywany albo metodą geometrycznie zawarunkowanej identyfikacji, lub metodą przecięć promieni rdzennych. Obie metody wymagają znajomości parametrów orientacji wewnętrznej i zewnętrznej. Określanie parametrów orientacji jest słabą stroną w pełni automatycznych procesów. Wykrywanie i selekcja punktów używanych do orientacji nadal w większości przypadków bazuje na pracy operatora, który traktowany jest jako element systemu. Nie ma to istotnego znaczenia w takich zastosowaniach, gdzie orientację wyznacza się raz (i ewentualnie kontroluje co jakiś czas), a wykorzystywana jest ona do serii pomiarów.

3.Problem lokalizacji sensorów przy konfiguracji wielostanowiskowej sieci zdjęć zbieżnych

Wysoką dokładność pomiaru można uzyskać metodami fotogrametrii bliskiego zasięgu poprzez wybór odpowiedniego modelu matematycznego procesu, np. zastosowanie do wyrównania metody niezależnych wiązek, kalibrację systemu pomiarowego oraz właściwą konfigurację wielostanowiskowej sieci zdjęć zbieżnych. Na znaczenie procesu właściwego projektowania sieci szczególną uwagę zwrócił S.Mason (1994).

Projektowanie sieci jest procesem, w którym cele precyzyjnego, wiarygodnego i ekono-

micznego pomiaru obiektu są realizowane poprzez odpowiednią konfigurację sieci fotogrametrycznych. Projektowanie takich sieci jest realizowane w praktyce za pomocą strategii symulacyjnej. Opiera się ona na doświadczeniu projektanta w uwzględnieniu wielu wzajemnie powiązanych i często sprzecznych z sobą wymagań projektowych.

Zaczynając od wyboru schematu obserwacji (sensor, ogniskowa, instrument do pomiaru zdjęć, algorytm) projektant przystępuje następnie do skonstruowania przybliżenia odpowiedniej konfiguracji. Po projekcie przybliżonym stosując metodę wiązek symulowana jest konfiguracja zdjęć aby uzyskać estymatory opisujące precyzję i wiarygodność operacji pomiarowych. Diagnostyka oparta na tych estymatorach pozwala na identyfikację błędów projektu oraz na podjęcie pewnych działań zaradczych mających na celu ich wyeliminowanie. Ograniczenie strategii projektowania przez symulację polega na tym, że na ogół potrzebny jest ekspert aby poradzić sobie z trudnymi przypadkami.

W Instytucie Geodezji i Fotogrametrii w Zurychu opracowano system ekspercki o nazwie CONSENS służący do projektowania sieci z uwzględnieniem zdjęć zbieżnych. Konfigurowanie silnej geometrii obrazów w tym systemie polega na określeniu liczby stanowisk kamery tworzących sieć oraz ich lokalizacji. Najistotniejszym założeniem jest zwrócenie większej uwagi na to, aby każdy punkt był określany na drodze przecięcia promieni pod optymalnym kątem niż uzyskanie pokrycia obiektu założoną liczbą zdjęć.

Mocna konfiguracja jest definiowana jako taka, przy której wszystkie punkty są uzyskane z przecięcia promieni w płaszczyznach poziomej i pionowych pod kątami o wartościach od 60° do 90° .

Przy wyborze lokalizacji stanowiska należy wziąć pod uwagę: skalę obrazu, rozdzielczość, ograniczenie przestrzeni wokół obiektu, głęboką ostrość, kąt padania promieni, liczbę i rozkład punktów, oświetlenie, kąty przecięcia promieni, pole widzenia, widoczność.

4. Przykłady wykorzystania fotogrametrycznych cyfrowych systemów bliskiego zasięgu w przemyśle stoczniowym

1. Wykorzystanie wysokorozdzielczego cyfrowego aparatu fotograficznego.

Aby ocenić funkcjonalność i przydatność wysokorozdzielczego cyfrowego aparatu fotograficznego Kodak DCS 200, posiadającego możliwość rejestracji zatrzymanych obrazów, Instytut Geodezji i Fotogrametrii w Zurychu przeprowadził pilotowe studia w stoczni BIW w Maine, USA. [T.P.Kersten,H.G.Mass, 1994]. Celem badań było określenie współrzędnych przestrzennych punktów sekcji statku dla skontrolowania jej wymiarów, co ma wpływ na poprawienie jakości i przyspieszenie montażu tych sekcji. Aktualnie kontrola wymiarów jest przeprowadzana przed końcowym montażem za pomocą teodolitów i taśm stalowych.

Badania przeprowadzono w rzeczywistych warunkach panujących w stoczni, co oznacza, że wystąpiły takie efekty zakłócające jak: wibracja, światło palników, zmienność temperatury, tymczasowe przysłanianie sygnałów itp.

Do realizacji zadania wybrano cyfrowy aparat fotograficzny o wysokiej rozdzielczości, ze względu na jej niezależność od zewnętrznego zasilania oraz sposobów rejestracji obrazów. Kamery CCD najczęściej używane w fotogrametrii bliskiego zasięgu wymagają komputera dla pozyskania i zapamiętania obrazu, podczas gdy cyfrowe aparaty fotograficzne stanowią całkowicie niezależny system pozyskiwania obrazów. Kamera DCS 200 jest głównie używana dla celów reporterskich i nie jest oczywiście skalibrowana dla celów metrycznych. Badania przeprowadzone z wykorzystaniem tej kamery przez różnych autorów wykazały, że możliwe jest uzyskanie dokładności względnej w granicach od 1 : 50 000 do 1 : 90 000. W przeprowadzonych badaniach nie dysponowano dokładnym polem do kalibracji, tak więc zastosowano metodę samokalibracji, która dała dokładność względną 1 : 40 000.

Aparat Kodak DCS 200 składa się ze zmodyfikowanego korpusu aparatu Nikon 8008s, posiadającego w płaszczyźnie obrazowej sensory CCD o wymiarach 1524 x 1012 pikseli (14.0 mm x 9.3 mm). Aparat może posiadać sensory CCD umożliwiające wykonanie obrazów czarno-białych lub kolorowych. Obrazy mogą być zapamiętywane na 2 MB DRAM lub na 80 MB wewnętrznym twardym dysku, na którym można zapamiętać do 50-ciu nieskompresowanych obrazów.

Używano dwu rodzajów obiektywów Nikkor: 18 mm i 28 mm. Ze względu na małe wymiary płytki sensorów pole widzenia Nikkor 18 mm odpowiada obiektywowi 45 mm, a Nikkor 28 mm odpowiada obiektywowi 70 mm normalnego aparatu małoobrazkowego.

Przeprowadzono cztery projekty pilotowe, które związane były z określeniem przestrzennego położenia sygnalizowanych punktów i mogą być traktowane jako typowe dla zastosowań w przemyśle stoczniowym. Spośród czterech projektów najbardziej interesujący był projekt nr 2. Dotyczył on montażu sekcji statku o wymiarach w przybliżeniu 25 x 12 x 6m. Wymagana dokładność określenia przestrzennego położenia punktów wynosiła 1,6 mm (1/16 cala).

W celu ustalenia wspólnych dla wszystkich zdjęć elementów orientacji wewnętrznej, przy wykonywaniu zdjęć kamerą DCS 200 wyłączono działanie systemu autofocus i aparat zogniskowano na nieskończoność. Punkty zaznaczone były specjalnymi odblaskowymi sygnałami o wymiarach 20 mm. Do oświetlenia obiektu wykorzystano standardową lampę błyskową Nikon. Sekcja statku została sfotografowana z 7-miu stanowisk, z których wykonano 32 zdjęcia.

Obrazy cyfrowe wykonane DCS 200 były opracowane metodą semi-automatyczną. Współrzędne tłowe sygnalizowanych punktów określono metodą wzajemnego dopasowania z uwzględnieniem warunku najmniejszych kwadratów lub wykorzystując operator centroidu. Elementy orientacji kamer, współrzędne przestrzenne wyznaczanych punktów oraz parametry dodatkowe (jeśli stosowano procedurę samokalibracji) były określone równocześnie metodą wyrównania niezależnych wiązek. Przy wyrównaniu oparto się na 3-ch punktach kontrolnych. W publikacji [T.P.Kersten, H.G.Mass, 1994] nie podano jednakże jakiego programu użyto do obliczeń. W metodzie wyrównania niezależnych wiązek z samokalibracją wyznaczano 9 parametrów dodatkowych.

Uzyskano następujące błędy określenia współrzędnych przestrzennych:

$$\sigma_X = 0.47\text{mm} \quad \sigma_Y = 1.47\text{mm} \quad \sigma_Z = 0.37\text{mm}$$

Odchylenie standardowe a posteriori spostrzeżenia o wadze jeden dla wyrównania wiązek wyniosło od 0,44 μm do 0,59 μm . Odpowiada to w przybliżeniu 1/20 piksela. W przeprowadzonych badaniach uzyskano dla kamery DCS 200 względną dokładność 1:75 000.

2. Wykorzystanie aparatu małoobrazkowego Leica R5

Zespół Politechniki w Zurichu wykonał również, na tym samym polu testowym co omówione poprzednio, badania aparatem Leica R5. Jest to małoobrazkowy (36 x 24 mm) w pełni automatyczny aparat posiadający siatkę 7 x 5 krzyży reseau. Dla wykonania zdjęć wykorzystano obiektyw Elmarit 35 mm. Jako materiału negatywowego użyto filmów Ilford FP4plus.

Negatywy wykonane aparatem Leica zostały zeskanowane na skanerze Agfa Horizon z rozdzielczością 1200 dpi, która odpowiada wymiarowi piksela 21 μm . Zeskanowany obraz zawierał 1700 x 1134 piksele, co jest porównywalne z wymiarami obrazu DCS 200.

Dla zdjęć wykonanych aparatem Leica R5 obiekt oświetlany był lampami halogenowymi 500 W. Aby uzyskać stabilne elementy orientacji wewnętrznej podczas wykonywania zdjęć, aparat zogniskowano na nieskończoność. Aparatem Leica R5 wykonano 7 zdjęć.

Zeskanowane obrazy opracowane były metodą semi-automatyczną. Krzyże siatki reseau'u mierzono automatycznie (przez dopasowanie metodą najmniejszych kwadratów).

Pomiar negatywów przeprowadzono na autografie analitycznym Leica AC3. Pomierzone współrzędne transformowano za pomocą transformacji afinicznej na podstawie krzyży siatki reseau.

Dla negatywów odchylenie standardowe dla spostrzeżenia o wadze jeden (σ_0) było w granicach od 2 do 6 μm . Dla zeskanowanych obrazów uzyskano dokładność 1/4 piksela. Wyniki uzyskane z użyciem aparatu Leica były od 1,4 do 2,0 razy gorsze od uzyskanych kamerą

Kodak DCS 200.

3. Wykorzystanie semi-metrycznej kamery Rolleiflex 6006 metric

Zespół Zakładu Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH w Krakowie przeprowadził w Stoczni Szczecińskiej badania dotyczące pomiaru jednej sekcji statku o wymiarach 12m x 12m x 6m. Celem ich było określenie rzeczywistej dokładności wyznaczenia współrzędnych przestrzennych punktów sygnalizowanych na badanym obiekcie w warunkach panujących w stoczni.

Rolleiflex 6006 metric jest kamerą semi-metryczną o formacie zdjęć 6x6 cm. Posiada siatkę krzyży resea'u (121 krzyży w siatce co 5 mm). Możliwe jest ogniskowanie kamery na następujące odległości : 1.62, 1.96, 2.49, 3.49, 5.88, 22.09, ∞ , dla których znana jest stała kamery. W metryce kalibracji kamery podana jest dystorsja radialna obiektywu, elementy orientacji wewnętrznej oraz kalibrowane współrzędne siatki krzyży resea'u.

Na obiekcie założono 113 punktów sygnalizowanych specjalnymi znakami. Geodezyjnie wyznaczono położenie 24 spośród tych punktów rozmieszczonych mniej więcej równomiernie na obiekcie. Pomiar wykonano biegunowo ze stanowisk o współrzędnych wyznaczonych metodą wcięcia wstecz. Aparatem Rollei z siatką krzyży resea'u wykonano 28 zdjęć.

Obliczenia przeprowadzono programem ORIENT opracowanym w Uniwersytecie Technicznym w Wiedniu oraz programami własnymi. ORIENT jest pakietem programów służących do obliczenia i wyrównania sieci fotogrametrycznych zdjęć naziemnych i lotniczych wykonanych zarówno kamerami metrycznymi jak i niemetrycznymi. Obliczenia wykonano w wielu wariantach różniących się: ilością i rozmieszczeniem punktów kontrolnych (dostosowania), ilością i konfiguracją wykonanych zdjęć, stopniem i sposobem korekcji błędów systematycznych odwzorowania (dystorsja, deformacja filmu).

Dystorsję radialną korygowano na podstawie danych zawartych w metryce kalibracji kamery. Programem ORIENT obliczono dla promieni radialnych współczynniki wielomianu korekcyjnego 4 stopnia. aproksymującego krzywą dystorsji. Następnie w oparciu o wielomian korygowano współrzędne tłowe obserwowanych punktów.. Dystorsja tangencjalna nie była korygowana ze względu na brak danych.

- Deformację filmu eliminowano na podstawie krzyży siatki resea'u w dwóch wariantach:
- z zastosowaniem transformacji rzutowej (współczynniki transformacji określone na podstawie 13 krzyży siatki resea'u),
 - z zastosowaniem transformacji biliniowej (korekcję przeprowadzano indywidualnie dla każdego punktu w oczkach siatki resea'u o wymiarach 10x10 mm)

Niepłaskość filmu została częściowo wyeliminowana poprzez transformację w oparciu o siatkę krzyży resea'u. Korekcje te przeprowadzono własnymi programami przed wprowadzeniem współrzędnych tłowych do programu ORIENT.

Obliczenia przeprowadzono przy następujących założeniach :

- wszystkie zdjęcia są wyrównywane równocześnie metodą niezależnych wiązek
- współrzędne punktów kontrolnych określone są z błędami $m_x = m_y = m_z = 1 \text{ mm}$
- znane są elementy orientacji wewnętrznej kamery (dla większości wariantów obliczeń)

Niewiadomymi w procesie wyrównania były współrzędne punktów wyznaczanych oraz elementy orientacji zewnętrznej zdjęć ($X_o, Y_o, Z_o, \omega, \varphi, \chi$), a dla niektórych wariantów ponadto elementy orientacji wewnętrznej kamery.

Jako główny miernik uzyskanej dokładności przyjęto zgodność współrzędnych punktów kontrolowanych wyznaczonych z wyrównania sieci ze współrzędnymi uzyskanymi metodą geodezyjną.

4. Wykorzystanie zdjęć wykonanych kamerą UMK 10/1318.

W celu porównania wyników wykonano również zdjęcia kamerą UMK 10/1318 firmy Zeiss Jena. Kamerą UMK wykonano 14 zdjęć na błonie fotograficznej.

W obliczeniach wykorzystywano 13 zdjęć obejmujących cały obiekt. Ze względu na brak danych z kalibracji kamery przyjmowano nominalne elementy orientacji wewnętrznej, a w jednym wariantcie obliczeniowym jako niewiadome przyjęto elementy orientacji wewnętrznej. Zdjęcia mierzono na Stecometrze , obliczenia przeprowadzono metodą niezależnych wiązek z wykorzystaniem pakietu ORIENT.

Wnioski z pomiarów przeprowadzonych w AGH

Analizując uzyskane wyniki wyrównania dwóch sieci fotogrametrycznych: sieci zdjęć wykonanych aparatem Rollei oraz sieci zdjęć z UMK można poczynić pewne spostrzeżenia i wyprowadzić z nich wnioski co do optymalizacji ewentualnych przyszłych pomiarów.

W przypadku sieci zdjęć wykonanych kamerą Rollei wydawałoby się iż liczba zdjęć jest znaczna, ale ilość promieni jednoimiennych przypadających na dany punkt (ilość przecięć) nie była duża. Spowodowane to jest faktem, że przy względnie korzystnej (dużej) skali zdjęć stosowano zbyt małe zakładki w trosce o nie powiększanie zbytnio liczby stanowisk kamery. Przy tym w stosunku do ilości zdjęć liczba mierzonych punktów jest zbyt mała, co daje słabo uwarunkowaną sieć. Błędy wyznaczenia poszczególnych punktów mierzonego obiektu (dokładność wewnętrzna) są różne i wynoszą od poniżej 1mm do kilku milimetrów i są uzależ-

nione od usytuowania punktu.

Analiza wyników uzyskanych z pomiaru sieci zdjęć wykonanych kamerą UMK prowadzi natomiast do innych spostrzeżeń. Ponieważ kąt rozwarcia kamery jest tu duży, obiekt jest odwzorowany w znacznej swej części na każdym zdjęciu, a zatem ilość zdjęć jest mniejsza. Stosunek ilości pomierzonych punktów do ilości zdjęć jest tu bardziej korzystny. Błędy wyznaczenia punktów obiektu (dokładność wewnętrzna) są w tym przypadku niewielkie i wynoszą ok. 1mm. Jednak dokładność zewnętrzna uzyskana na punktach kontrolowanych jest znacznie niższa niż wewnętrzna. Może to być spowodowane brakiem aktualnych danych o kalibracji kamery. Co prawda w jednym z wariantów obliczeń wyznaczano również elementy orientacji wewnętrznej kamery ale nie uzyskano lepszych wyników, a wykonanie samokalibracji znacznie osłabia sieć.

Uzyskane wyniki określenia współrzędnych przestrzennych są nieco poniżej oczekiwań. Zbliżone wyniki uzyskane dla zdjęć wykonanych kamerami UMK i Rollei dla różnych wariantów świadczą o występowaniu pewnych czynników obniżających dokładność, ale nie związanych ze zdjęciami. Analiza odchyłek na punktach kontrolowanych wykazuje zgrupowanie w pewnych strefach obiektu zbliżonych wartości odchyłek, co świadczy o wystąpieniu lokalnych deformacji sieci. Zachodzi pytanie co je spowodowało ?. Można podejrzewać, że główną przyczyną był brak synchronizacji w czasie pomiarów geodezyjnych z wykonaniem zdjęć. Odstęp czasowy wyniósł kilka godzin, a w tym czasie zmieniały się warunki pogodowe. Mierzony obiekt jest podatny na zmiany temperatury spowodowane nasłonecznieniem. Wpływ ten szacunkowo może spowodować zmianę wymiarów obiektu rzędu kilku milimetrów. Obiekt należy więc traktować jako dynamiczny i jego pomiary wykonywać w takich warunkach, aby wpływ czynnika powodującego zmiany był nieistotny lub minimalny. Należy zatem zsynchronizować w czasie pomiary geodezyjne i wykonanie zdjęć. Należy dążyć do jak najkrótszego okresu ich wykonywania.

Konfiguracja wykonanych zdjęć (zdjęcia z jednego poziomu) powoduje niezbyt silne uwarunkowanie układu równań oraz jego wrażliwość na obserwacje odstające. Wzmocnienie uwarunkowania układu równań można uzyskać przez zwiększenie liczby punktów kontrolnych (co najmniej dwukrotnie więcej niż wymagane minimum) oraz określenie współrzędnych środków rzutów (jeżeli zdjęcia wykonuje się ze statywu, określenie współrzędnych środka rzutów jest operacją prostszą niż pomiar punktu kontrolnego). Jako dodatkowe elementy kontrolne lub warunki można przyjąć odległości (które łatwo zmierzyć) pomiędzy punktami na obiekcie.

Zestawienie wyników omówionych przykładów

Wymiar obiektu	Kamera	Ogniskowa [mm]	Typ danych/metoda	Ilość pktów	Ilość zdjęć	Błędy współrzędnych			Błędy na zdjęciu [μm]
						m_x [mm]	m_y [mm]	m_z [mm]	
25 x 12 x 6	DCS200	28	cyfrowe	37	32	0.5	1.5	0.4	0.5
25 x 12 x 6	DCS200	18	cyfrowe	33	19	0.4	1.2	0.4	0.4
25 x 12 x 6	Leica	35	analog.	43	7	0.8	1.8	0.6	2.0
25 x 12 x 6	Leica	35	an./skan.	44	7	2.3	5.2	1.8	5.0
12 x 12 x 6	Rollei	50	analog.	24	28	1.8	2.1	1.2	7.0
12 x 12 x 6	Rollei	50	an./samokal.	24	28	2.0	2.0	1.7	7.0
12 x 12 x 6	UMK	100	analog.	24	13	1.8	3.5	1.6	6.0
12 x 12 x 6	UMK	100	an./samokal.	24	13	1.5	.04	1.7	6.0

5. Podsumowanie

Problem wykorzystania obrazów fotograficznych i cyfrowych do precyzyjnego wymiarowania elementów konstrukcji urządzeń lub budowli, (np. statków) może znaleźć rozwiązanie technologiczne w oparciu o najnowsze algorytmy analizy obrazów cyfrowych. Należy się spodziewać, że szybki rozwój aparatów fotograficznych z macierzą sensorów CCD umożliwi uzyskiwanie wysokich dokładności w typowych warunkach panujących w stoczniach. Na bazie dotychczasowych doświadczeń wydaje się realne stworzenie w pełni automatycznego systemu cyfrowej fotogrametrii bliskiego zasięgu.

6. Podziękowania

Część cytowanych przykładów pomiarowych powstała w ramach pracy zespołowej przy udziale mgr inż. Andrzeja Rachwała z zespołem z firmy GEOMETR. Autorzy składają wyrazy podziękowania za owocną współpracę.

Literatura

- Bernasik J., 1996: „Fotogrametria narzędziem w diagnostyce żelbetowych kominów przemysłowych”. Budownictwo i Inżynieria nr.12/96 s.714-716
- Beyer H.A., 1992. Geometric and radiometric analysis of a CCD-camera based photogrammetric close-range system. Dissertation Nootogrammetry and Remote Sensing, Kyoto, 27,

B5, pp.119-129.

- Fraser C.S., 1992: „Photogrammetric Measurement to One Part in a Million”. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, nr58(3), s.305-310.
- Jachimski J., Żuławski Cz.,1959: „Próba zastosowania pomiaru fotogrametrycznego do badania erozji zwałów kopalnianych”. *Prace Komisji Gleboznawczo-Górnictwa PAN* nr.22/59, s.141-167
- Jachimski J., Trocha W.,1992: „Determination of the position of crosses with the subpixel accuracy on the image taken with the CCD camera”. *IAPRS vol.29-5*,s.391-396.
- Kersten T.P., Maas H.G.,1994: „Digital High Resolution Still Video Camera versus Film-based Camera in Photogrammetric Industrial Metrology”. *IAPRS Vol.30-1*,s.114-121
- Mason S., 1994: „Conceptual Model of the Sensor Station Placement Task in Configuring Multistation Convergent Networks”. *IAPRS*, vol.30-5, s.256-264
- Mierzwa W.,1995: „Fotogrametryczny pomiar kształtu i deformacji chłodni kominowych”. Konferencja Naukowo-Techniczna „Naprawa i modernizacja chłodni kominowych”, Bełchatów 1995.
- Szczechowski B., 1991: „Zdalnie synchronizowane zdjęcia fotogrametryczne w zastosowaniu do badań zjawisk dynamicznych”. *Symposium Naukowe PTF, Warszawa 1991.*

Możliwości wykorzystania obrazów fotograficznych i cyfrowych w przemysłowej metrologii

Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH

Józef Jachimski, Władysław Mierzwa, Adam Boroń, Regina Tokarczyk, Andrzej Wróbel

Streszczenie

Pomiary inwentaryzacyjne obiektów przemysłowych metodą klasycznej fotogrametrii cechuje stosunkowo duża szybkość wykonania prac terenowych i zadowalająca dokładność uzyskanych wyników, niestety są one czasochłonne w zakresie prac kameralnych. W przemyśle stoczniovym istnieje zapotrzebowanie na wysokodokładną technologię pomiarową, która również będzie satysfakcjonująca z punktu widzenia łatwości i szybkości przeprowadzenia prac terenowych i kameralnych. Dużą nadzieję stwarza tutaj fotogrametria cyfrowa. Umożliwia ona ominięcie czasochłonnego procesu fotochemicznego oraz automatyzację identyfikacji i pomiaru punktów na zdjęciach.

Problemem efektywnego zastosowania fotogrametrii cyfrowej do pomiarów obiektów przemysłowych zajmowało się wiele ośrodków badawczych. Zespół Politechniki w Zurichu przeprowadził badania w rzeczywistych warunkach stoczni, wykorzystując aparat cyfrowy Kodak DCS 200 i aparat małoobrazkowy Leica R5. Zespół Zakładu Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH przeprowadził w Stoczni Szczecińskiej badania jednej sekcji statku za pomocą semi-metrycznej kamery Rolleiflex 6006 i kamery UMK10/1318.

Na bazie analizowanych eksperymentów stwierdzono iż szybki rozwój aparatów fotograficznych z macierzą sensorów CCD umożliwi uzyskiwanie wysokich dokładności w typowych warunkach panujących w stoczniach. Wydaje się, że jest realne stworzenie w pełni automatycznego systemu cyfrowej fotogrametrii bliskiego zasięgu

Possibility of application of photographic and digital images in industrial metrology

Józef Jachimski, Władysław Mierzwa, Adam Boroń, Regina Tokarczyk, Andrzej Wróbel

Summary

Measurement of industrial objects by means of classical photogrammetric method is characterised by relatively fast performance of field work and satisfactory accuracy of results, but is time consuming during office work. In ship building industry demand exist on high precision measurement technology, which would be also satisfactory from the point of view of speed, and ease of field as well as office work performance. Very promising seems to be a digital photogrammetry. It make possible to avoid a time consuming stage of photos development and automation of identification and measurements of points on images.

The problem of effective use of modern photogrammetry methods for industrial metrology purposes has been undertaken by many research institutions. The team from Technical University in Zurich compare the functionality and performance of digital high resolution still video camera DC 200 and film-based small format camera Leica R5 in some typical application under real condition existing in a shipyard. The team from University of Mining and Metallurgy, Kraków investigate in the Szczecin Shipyard one ship section by means of semi-metric camera Rollei 6006 and camera UMK 10/1318.

Basing on the results of studied experiments it can be stated that further development of cameras with CCD sensors make it possible to achieve high accuracy of ship section dimensioning under real conditions existing in a shipyard.

It seems that fully automatic system of a digital photogrammetry can be constructed soon.

Dr inż. Krystian Pyka

Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH

Recenzja manuskryptu publikacji: „Możliwości wykorzystania obrazów fotograficznych i cyfrowych w przemysłowej metrologii”

Od połowy lat pięćdziesiątych obserwuje się w Polsce renesans metod fotogrametrycznych w zastosowaniach produkcyjnych. Zbiega się on ze światowym sukcesem fotogrametrii cyfrowej.

Przedstawiona do recenzji praca jest dyskusją metod fotogrametrycznych jakie potencjalnie mogą być zastosowane dla potrzeb przemysłu stoczniowego. Autorzy przeprowadzili eksperyment praktyczny i dokonali rzetelnej analizy dokładnościowej w relacji do podobnych badań szwajcarskich. Udowodnili możliwość uzyskania milimetrowych dokładności metodami fotogrametrycznymi. Wskazali na krytyczne punkty zastosowanej przez siebie technologii, a w konsekwencji wyciągnęli praktyczne wnioski dla dalszych prac badawczo-wdrożeniowych.

Praca nadaje się do publikacji w Zeszytach Naukowych AGH seria Geodezja.

Kraków 28.02.1997r.