

**Sprawozdanie z badań statutowych  
Zakładu Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej  
w 1996 r.**

Temat nr 11.150.47

**Metody i przyrządy fotogrametrycznych, teledetekcyjnych i geoinformatycznych  
systemów pozyskiwania, przetwarzania i udostępniania informacji**

Kierownik tematu: **Prof.dr hab.inż.Józef Jachimski**

Podtematy

1. **Doskonalenie metod określania parametrów warunkujących bezawaryjną eksploatację budowli i urządzeń przemysłowych**  
Wykonawca: **Prof.dr hab.inż.Jerzy Bernasik** (kierownik podtematu),
2. **Wstępna analiza możliwości wykorzystania obrazów fotograficznych i cyfrowych do precyzyjnego wymiarowania wielkogabarytowych prefabrykowanych elementów.**  
Wykonawcy: **Prof.dr hab.inż.Józef Jachimski** (kierownik tematu), **Dr inż.Adam Boroń**, **Dr inż.Władysław Mierzwa**, **Dr inż.Regina Tokarczyk**, **Dr inż.Andrzej Wróbel**, **Mgr inż.Andrzej Rachwał**
3. **Analiza zakresu tematycznego informacji o rozwoju teorii i zastosowań fotogrametrii, teledetekcji oraz GIS jaką można by było pozyskać kanałami Międzynarodowego Towarzystwa Fotogrametrii i Teledetekcji.**  
Wykonawcy: **Prof.dr hab.inż.Józef Jachimski**, **Prof.dr hab.inż.Peter Waldhausl**
4. **Cyfrowy Termometr Matrycowy (CTM-1) do pomiaru temperatury powierzchni ośrodka gruntowego.**  
Wykonawcy: **Dr inż. Stanisław Mularz**, **Mgr inż. Beata Hejmanowska**
5. **Integracja programu SCOP i wybranych systemów GIS.**  
Wykonawcy: **Dr inż.Krzystian Pyka**, **Mgr inż. Marta Borowiec**

Metody i przyrządy fotogrametrycznych, teledetekcyjnych i geoinformatycznych systemów pozyskiwania, przetwarzania i udostępniania informacji

### **Podtemat nr 1**

### **„Doskonalenie metod określania parametrów warunkujących bezawaryjną eksploatację budowli i urządzeń przemysłowych”**

Wykonawca: dr hab.inż.Jerzy Bernasik, prof.AGH

Zawartość opracowania:

1. Nowe możliwości fotogrametrii jako źródła informacji stanowiących podstawę ekspertyzy budowlanej wysokiego komina żelbetowego.

Publikacje - w załączeniu

1. Bernasik J. Fotogrametria narzędziem w diagnostyce żelbetowych kominów przemysłowych. Inżynieria i Budownictwo, Warszawa, Nr 12/96.
2. Bernasik J. Racjonalizacja kontrolnych pomiarów hal fabrycznych. Przegląd Geodezyjny. Warszawa, 2/96

### **Nowe możliwości fotogrametrii, jako źródła informacji stanowiących podstawę ekspertyzy budowlanej wysokiego komina żelbetowego.**

Wysokie kominy żelbetowe są poddawane ocenom stanu technicznego; efektem jest ekspertyza budowlana. Przeprowadzone badania pozwoliły wypracować nowe rozwiązania, rozszerzające gamę informacji pomiarowych oraz sposób dochodzenia do optymalnej - z punktu widzenia eksperta budowlanego formy ich prezentacji. Wykonując prace fotogrametryczne mające za cel określenie odchyłeń od pionowości, można niejako „przy okazji” określać (w razie potrzeb opracowującego ekspertyzę): średnice, owalizacje przekroji, zbieżność trzonu, załamania osi itp.

Nowością opracowania są: rozszerzenie dokumentacji o zdjęcia „fotointerpretacyjne”, niestandardowy przebieg opracowania (pomiar wyjściowy, a następnie kolejne pomiary dodatkowe fotogramów w zależności od potrzeb ekspertyzy), wyznaczanie i prezentacje rozmaitych anomalii komina.

Programy SURFER-a: GRID, GRAFIT, PLOT jako kontynuacja obliczeń programem KOMIN (A.Tokarczyka), stwarzają szerokie możliwości prezentacji graficznych (ilustrujących zestawienia liczbowe).

W publikacji [ 1 ] opisano i zilustrowano konkretny przypadek budowania ekspertyzy budowlanej - krok po kroku - przy udziale fotogrametry dostarczającego (w razie potrzeby) odpowiedzi na pojawiające się pytania pomiarowe. Taką możliwość stwarza jedynie metoda fotogrametryczna. Wiedzę o tym należało przybliżyć inżynierom budownictwa. Dlatego też - opracowanie awizowane w sprawozdaniu za rok 1995 (jako „przygotowane do opublikowania”) zostało rozszerzone w ten sposób, aby mogło być upowszechnione wśród ekspertów budowlanych.

Według założeń Autora i doświadczeń zdobytych w trakcie badań, możliwe jest budowanie ekspertyzy budowlanej „krok po kroku” przy udziale fotogrametry

.

## **Podtemat nr 2**

**Wstępna analiza możliwości wykorzystania obrazów fotograficznych i cyfrowych do precyzyjnego wymiarowania wielkogabarytowych prefabrykowanych elementów.**

**Wykonawcy: Prof.dr hab.inż.Józef Jachimski (kierownik tematu), Dr inż.Adam Boroń, Dr inż.Władysław Mierzwa, Dr inż.Regina Tokarczyk, Dr inż.Andrzej Wróbel, Mgr inż. Andrzej Rachwał**

Publikacja - w załączeniu

Przyjęta do druku w „Geodezja” Nr ..... AGH, Kraków 1997

W załączonej publikacji przedstawiono założenia metod bezkontaktowego wymiarowania dużych elementów montażowych budowli i obiektów inżynierskich. W oparciu o literaturę przedmiotu przedyskutowano możliwości wykorzystania niefotogrametrycznych zobrażeń fotograficznych i cyfrowych do rejestracji obiektu, możliwości częściowej i pełnej automatyzacji procesu opracowania, jak i problem optymalizacji rozmieszczenia sensorów w wielostanowiskowej sieci zobrażeń zbieżnych. Przedstawiono również przykłady wykorzystania fotogrametrycznych cyfrowych systemów bliskiego zasięgu w przemyśle stoczniowym. Obiecujące wyniki wstępnych badań stwarzają dobrą platformę dla dalszych prac badawczych w tym temacie.

**Podtemat nr 3 :**

**Analiza zakresu tematycznej informacji o rozwoju teorii i zastosowań fotogrametrii, teledetekcji oraz GIS, jaką można by było pozyskać kanałami Międzynarodowego Towarzystwa Fotogrametrii i Teledetekcji.**

Wykonawcy: **Prof.dr hab.inż. Józef Jachimski, Prof. dr hab.inż.Peter Waldhausl**

Publikacja - w załączeniu

Prof. Dr hab.inż. Józef Jachimski i Prof. Dr hab.inż. Peter Waldhäusl „Objectives and guidelines for ISPRS Member Reports”. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol.XXXI - B6. Wiedeń 1996. Invited Paper na Kongres ISPRS

W ramach współpracy międzynarodowej z Politechniką w Wiedniu na zaproszenie Komisji VI International Society for Photogrammetry & Remote Sensing przeprowadzono obszerne studium podziału tematycznej informacji o rozwoju dziedziny Fotogrametrii, Teledetekcji oraz Geograficznych Systemów Informacyjnych. Uwzględniono różne poziomy istotności informacji i zaproponowano jakościowe i ilościowe wskaźniki obrazujące trendy rozwojowe.

Opracowany materiał był przedmiotem dyskusji na forum Międzynarodowego Towarzystwa Fotogrametrii i Teledetekcji, gdzie wywołał duże zainteresowanie.

**Podtemat nr 4.**

**Cyfrowy Termometr Matrycowy (CTM-1) do pomiaru temperatury powierzchni ośrodka gruntowego**

Pomiary temperatury kinetycznej powierzchni różnych obiektów naturalnych i antropogenicznych są niezbędne m.in. do kalibracji zobrażeń termalnych pozyskiwanych za pomocą kamer i skanerów termalnych. Urządzenia te rejestrują bowiem poziom tzw. temperatury radiacyjnej, która jest funkcją temperatury kinetycznej i właściwości emisyjnych badanego obiektu. Bezpośredni pomiar temperatury kinetycznej powierzchni gruntowych przy tradycyjnym pomiarze jest mało dokładny, żmudny i nastęrcza sporo kłopotów natury technicznej i organizacyjnej. Ponadto wyniki tego rodzaju pomiarów są mało przydatne dla kalibracji danych teledetekcyjnych, gdyż przy zwykłym pomiarze punktowym niezwykle trudno jest uwzględnić wpływ tzw. samozacienienia powierzchni gruntu. Stąd powstała konieczność zaprojektowania i skonstruowania Cyfrowego Termometru Matrycowego, który

umożliwia automatyczny pomiar temperatury powierzchni gruntu z uwzględnieniem mikro- i mezoreliefu tej powierzchni. Przyrząd zbudowano we współpracy z Zakładem Metrologii, Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki AGH w Krakowie.

W świetle przeprowadzonych wstępnych badań testowych (w laboratorium oraz in situ) termometr matrycowy okazał się urządzeniem w pełni przydatnym do pomiarów temperatury gruntu, zwłaszcza tam, gdzie występuje urozmaicony mikrorelief. Świadczy to o trafności zarówno przyjętej koncepcji jak i rozwiązań konstrukcyjnych. Szczegóły dotyczące konstrukcji przyrządu oraz wyniki pomiarów zawiera publikacja pt.: „Pomiary temperatury kinetycznej powierzchni gruntu przy użyciu Cyfrowego Termometru Matrycowego” (kserokopia w załączeniu). Koncepcja oraz niektóre elementy rozwiązania konstrukcyjnego są przedmiotem postępowania patentowego.

#### **Podtemat nr 5**

#### **Integracja programu SCOP i wybranych systemów GIS**

Wykonawcy: **Dr inż.Krystian Pyka, Mgr inż.Marta Borowiec**

W 1993 roku, dzięki wsparciu finansowemu rządu austriackiego, Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej otrzymał program SCOP. Jest to profesjonalne narzędzie do opracowywania Numerycznego Modelu Terenu. Program, będący owocem kilkudziesięcioletnich doświadczeń, jest uważany za czołowy produkt w zakresie NMT. Wraz z rozwojem systemów informacji geograficznej i informacji o terenie wzrasta zainteresowanie wykorzystaniem NMT. Programy z zakresu GIS posiadają pewne możliwości generowania NMT, jednakże w większości przypadków są to rozwiązania uproszczone. Stąd pomysł zasilania systemów GIS przez specjalistyczny program SCOP.

W ramach badań statutowych opracowano metodykę postępowania, pozwalającą wykorzystywać NMT opracowany przez SCOP w następujących programach GIS: IDRISI, GRASS, MGE Intergraph. Ponadto wdrożono współdziałanie programu MicroStation dla potrzeb pozyskiwania danych dla programu SCOP.

## 1. Współpraca SCOP i MicroStation dla potrzeb pozyskiwania danych i detekcji błędów

Program MicroStation pozwala na sprawne pozyskiwanie informacji wysokościowych z istniejących podkładów kartograficznych. Przy współpracy z I/GeoVec możliwa jest m.in. półautomatyczna wektoryzacja warstw. Dane w formacie MicroStation wymagają konwersji na format SCOP. W tym celu zlecono opracowanie aplikacji dokonującej eksportu danych, funkcjonującej w środowisku MicroStation. Dane są przygotowywane według odpowiedniej struktury, program konwersujący tworzy odpowiednio obiekty przestrzenne akceptowane przez SCOP.

W wyniku obliczeń realizowanych przez SCOP uzyskiwany jest wykaz odchylek pomiędzy matematycznym modelem powierzchni a danymi rzeczywistymi. Diagnoza odchylek przekraczających zadane kryterium jest problemem dość złożonym. Pomocna jest znajomość lokalizacji odchylek i możliwość wizualnej konfrontacji z danymi źródłowymi. W tym celu liczba odchylek jest „zwracana” do Mikro Station, tam analizowana i, po usunięciu przyczyny dane są ponownie eksportowane do formatu SCOP.

## 2. Przesyłanie NMT do systemów GIS.

NMT opracowany przez SCOP jest przekształcany do postaci dyskretnej, regularnej siatki, której struktura pozwala na określenie współrzędnych XYZ w każdym węźle. Taka postać jest następnie modyfikowana w zależności od adresata danych. Modyfikacja ma charakter albo odpowiedniego grupowania informacji, albo zmiany kolejności informacji (wiersz, kolumna), a skutkuje uzyskaniem danych ASCII przyjmowanych przez programy IDRISI, GRASS, MGE Intergraph.

Dalsze wykorzystanie NMT odbywa się już wewnątrz systemów GIS. Systemy te zapewniają użytkownikowi większy komfort pracy, szersze spektrum analiz z wykorzystaniem NMT.

## 3. Dokumentacja efektów badań.

Praktycznym efektem badań są:

a) zestaw programów komputerowych, z których najważniejsze to:

- TOWAR, aplikacja MDL w środowisku MicroStation, realizująca eksport danych do programu SCOP

- aplikacje DOS-owe do transmisji danych SCOP-GIS

b) linia technologiczna obejmująca:

- pozyskiwanie danych - MicroStation

- opracowanie NMT - SCOP

- przetwarzanie, analizy GIS - MGE Intergraph

c) publikacja zamieszczona w materiałach XVIII Kongresu ISPRS w Wiedniu (lipiec 1996)

autorzy: Marta Borowiec, Krystian Pyka

tytuł: SCOP as an All-Purpose Tool for Elaboration of Digital Terrain Model - the User's  
Comments

miejsce publikacji: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing,  
vol.XXXI, Com.IV, pp.661-665

# Możliwości wykorzystania obrazów fotograficznych i cyfrowych w przemysłowej metrologii\*

( *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 a nawet na polu badania kształtu i erozji zboczy bardzo dużych skarp w kopalniach odkrywkowych (Jachimski 1959).

Rozwiązania typowe dla klasycznej fotogrametrii analogowej są często satysfakcjonujące z punktu widzenia szybkości wykonania prac terenowych, pomimo że ciężkie kamery fotogrametryczne nie są wygodne w użyciu. Również dokładności wyników inwentaryzacji są zadowalające: zarówno stosowanie zaawansowanych i od dawna sprawdzonych algorytmów obliczania wielostanowiskowych sieci terratriangulacji jak i stosowanie różnych prostszych metod fotogrametrii analitycznej gwarantuje pełny sukces. Niestety klasyczna fotogrametria jest czasochłonna w zakresie prac kameralnych, które wykazują oporność na automatyzację. Szczególnie pomiar obrazów wybranych punktów obiektu na zdjęciach musi być wykonywany ręcznie.

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

W latach sześćdziesiątych dotarły do cywilnych badaczy wyniki doświadczeń NASA związane z rejestracją i przesyłaniem obrazów satelitarnych do stacji naziemnych. Dzięki wprowadzeniu cyfrowej metody zapisu obrazu, polegającej na rozcłonkowaniu całego obrazu na małe elementy (piksele), dla których określano liczbową wartość średniej

---

\* Opracowano w ramach badań statutowych, temat 11.150.47



jasności, możliwe było uzyskanie jednoznaczności przekazu obrazu nawet na bardzo dużą odległość: przekazywano drogą radiową ciąg zero- jednokowych cyfr zamiast podatnego na zakłócenia płynnie zmieniającego się analogowego sygnału obrazu telewizyjnego. Tak stworzono podwaliny pod burzliwie rozwijającą się obecnie fotogrametrię cyfrową. Podstawą fotogrametrii cyfrowej jest komputerowe przetwarzanie półtonalnych obrazów pikselowych, które prowadzi do pełnej automatyzacji procesu przetwarzania. 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, a także na innych bardziej tradycyjnych polach. Fotogrametria cyfrowa pozwala na automatyzację wykonywania szeregu zadań pomiarowych jak: rozpoznawanie zmian, wysokodokładne wymiarowanie, śledzenie drogi obiektu, samorientacja, 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), długa sekwencja obrazów, wyraźna struktura obrazów, wymaganie semi- albo w pełni automatycznego przetwarzania (opracowania) w czasie rzeczywistym albo co najmniej on-line, interfejs do systemu CAD/CAAD. Możliwości opracowania wyników w trybie on-line i real-time pozwalają postrzegać fotogrametrię cyfrową bliskiego zasięgu w kontekście "robotów pomiarowych". Automatyczne postrzeganie należy do grupy zagadnień dotyczących "maszyn inteligentnych", w których używa się algorytmów obliczeniowych podobnych do stosowanych w fotogrametrii cyfrowej. Tak więc widzenie przez roboty, z punktu widzenia pozyskiwania i opracowania (przetwarzania) obrazów traktować należy jako odpowiednik fotogrametrii cyfrowej bliskiego zasięgu wykonywanej w czasie rzeczywistym (real- time).

## **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). Uzyskuje się to zazwyczaj w wyniku kolejnych kroków przetwarzania, segmentacji obrazów, ekstrakcji struktury geometrycznej i ekstrakcji struktury relacyjnej oraz semantyki [Gruen 1994].

Dobry model obiektu bardzo wspomaga automatyzację opracowania. Szczególnie w zastosowaniach przemysłowych model obiektu znany jest a priori, np. gdy określa się odchylenia rzeczywistego obiektu od jego modelu podanego w CAD. W takim przypadku semantyka obiektu jest już dostępna za pośrednictwem modelu CAD, który może wspomagać automatyczne opracowanie. Klasyczne podejście polega na rozpoznaniu szczegółów (feature extraction) 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 "generator odpowiedniości", np. algorytm dopasowywania obrazu lub wzorca (image or templet matching), albo algorytm przecięcia promieni rdzennych musi być zastosowany w celu ustalenia odpowiedniości obrazów określonego szczegółu na szeregu zdjęciach. Metodyka powyższa znalazła już wiele zastosowań i jest dobrze udokumentowana (Gruen 1985, Claus 1988, Haggren Haajanen 1990, Beyer 1991a, Maas 1991 1992a, Dold Maas 1993). Wprowadzono również rozwiązania wieloobrazowe, które wykorzystują równocześnie szereg obrazów tego samego obiektu. Większość z tych technik wytwarza niestrukturalne zbiory w formie punktów rozproszonych, pól wektorowych oraz krzywych przestrzennych.

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 (Wrobel 1987, Ebner, Heipke 1988, Kempa, Schuler 1993).

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 retroodbijające tarcze), 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 jest stosowane 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  $\pm 0.004$  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 (ok. 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. Można zauważyć, że przy zastosowaniu wielkoformatowych kamer CCD i semiautomatycznego 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 (Gruen 1985), lub metodą przecięć promieni rdzennych (Maas 1992b). 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 ekonomicznego 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 następnie przystępuje do skonstruowania przybliżenia odpowiedniej konfiguracji. Jest to przybliżenie częściowo dlatego, że poczynione są pewne uproszczenia przy wykorzystaniu wiedzy teoretycznej projektanta.

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 stosowanym przez ekspertów 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  $60^\circ$  do  $90^\circ$ .

Uwarunkowania przy wyborze lokalizacji stanowiska

1. skala obrazu
2. rozdzielczość
3. ograniczenie przestrzeni wokół obiektu
4. głębia ostrości
5. kąt padania promieni
6. liczba i rozkład punktów
7. oświetlenie
8. kąty przecięcia promieni
9. pole widzenia
10. widoczność

System umożliwia zaprojektowanie optymalnej konfiguracji dostosowanej do kształtu obiektu.

#### **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 Zurichu 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 kamerę video 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 kamery video z poklatkową rejestracją stanowią całkowicie niezależny cyfrowy 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 1524x1012 pikseli (14.0 mm \* 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. Do badań użyto DCS 200 z czarno-białymi sensorami i wewnętrznym 80 MB twardym dyskiem.

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 cal).

Przy wykonywaniu zdjęć kamerą DCS 200 wyłączono działanie systemu autofocus i kamerę zogniskowano na nieskończoność. Punkty zaznaczone były specjalnymi samoodbijającymi sygnałami. Do oświetlenia obiektu wykorzystano standardową lampę błyskową Nikon.

Aby ominąć zasłonięte fragmenty oraz uzyskać mocną geometrię sieci dla kalibracji kamery wykonano dodatkowe zdjęcia o innej orientacji. Sekcja statku była sfotografowana z 7-miu stanowisk, z których wykonano 32 zdjęcia. Sygnały miały wymiar 20 mm.

Obrazy cyfrowe wykonane DCS 200 były opracowane metodą semiautomatyczną. Współrzędne tło sygnalizowanych punktów były określone metodą wzajemnego dopasowania z uwzględnieniem warunku najmniejszych kwadratów (least squares matching) 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 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  $\mu\text{m}$  do 0,59  $\mu\text{m}$ . 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 badania na tym samym polu testowym co omówione poprzednio. Aparat Leica R5 jest małoobrazkowym (36 x 24 mm) w pełni automatycznym aparatem posiadającym siatkę 7x5 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  $\mu\text{m}$ . Zeskanowany obraz zawierał 1700x1134 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 z aparatu Leica opracowane były metodą semiautomatyczną. Krzyże siatki reseau były mierzone metodą dopasowania najlepszych kwadratów. Pomiar negatywów był przeprowadzony na autografie analitycznym Leica AC3. Pomierzone współrzędne były transformowane za pomocą transformacji afinicznej na podstawie krzyży siatki reseau.

Dla zdjęć wykonanych aparatem Leica odchylenie standardowe dla spostrzeżenia o wadze jeden ( $\sigma_0$ ) było w granicach od 2 do 6  $\mu\text{m}$ . 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 semimetryczną o formacie zdjęć 6x6 cm. Posiada siatkę krzyży reseau (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,  $\infty$ , dla których znana jest stała kamery. W metryce kalibracji kamery podana jest dystorsja radialna obiektywu, elementy orientacji wewnętrznej oraz kalibrowane współrzędne siatki krzyży reseau.

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 reseau 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 przeprowadzano 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  $m_x = m_y = m_z = 1$  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.

Wyniki działania programu ORIENT uzyskuje się w następującej postaci: współrzędne przestrzenne punktów wyznaczanych wraz z błędami ich wyznaczenia, współrzędne środków rzutów kamer oraz katowe elementy orientacji poszczególnych zdjęć z błędami ich określenia.. Ponadto podawany jest średni błąd położenia punktów na zdjęciach (w mikrometrach) po wyrównaniu.

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 wariancie obliczeniowym jako niewiadomą przyjęto elementy orientacji wewnętrznej. Zdjęcia mierzono na Stecometrze a 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 zbyt 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 uzależnione od usytuowania punktu.

Należałoby zatem wzmocnić sieć przez:

- wykonanie większej ilości zdjęć rozmieszczonych tak, aby liczba promieni wcinających dany punkt wynosiła kilka promieni ( conajmniej 4 ) i w miarę możliwości była taka sama dla wszystkich punktów,

- pomiar większej ilości punktów na obiekcie.

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 osłabiono 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 (conajmniej 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]	Typa danych/metoda	Ilość pktów	Ilość zdjęć	Błędy współrzędnych			Błędy na zdjęciu $\mu\text{m}$
						$m_x$ [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/samok	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/samok	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 stocznicach. Stworzenie w pełni automatycznego systemu cyfrowej fotogrametrii bliskiego zasięgu wydaje się realne na bazie dotychczasowych doświadczeń.

### 6. Wyrazy uznania

Część cytowanych przykładów pomiarowych powstała w ramach pracy zespołowej przy udziale: dr inż. Adama Boronia, dr inż. Reginy Tokarczyk, dr inż. Andrzeja Wróbla z Zakładu Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH oraz mgr inż. Andrzeja Rachwała z zespołem z firmy GEOMETR. Autorzy dają wyraz satysfakcji z powodu powierzenia im przez Zespół szaczonego obowiązku zaprezentowania rezultatów eksperymentów.

### Literatura

- Jachimski J., Żuławski Cz.,1959: „Próba zastosowania pomiaru fotogrametrycznego do badania erozji zwałów kopalnianych”. Prace Komisji Gleboznawczo-Górnictwej PAN” nr.22/59, s.141-167
- Bernasik J., 1996: „Fotogrametria narzędziem w diagnostyce żelbetowych kominów przemysłowych”. Budownictwo i Inżynieria nr.12/96 s.714-716
- Gruen A., 1994: „Digital Close-Range Photogrammetry - Progress Through Automation”. IAPRS, Vol.30-5, s.122-135
- Mason S., 1994: „Conceptual Model of the Sensor Station Placement Task in Configuring Multistation Convergent Networks”. IAPRS, vol.30-5, s.256-264
- Maas H.G., Kersten T.P.,1994: „Experiences with a high resolution still video camera in digital photogrammetric applications on a shipyard”. IAPRS,Vol.30-5,s.250-255
- Mierzwa W.,1995: „Fotogrametryczny pomiar kształtu i deformacji chłodni kominowych”. Konferencja Naukowo-Techniczna „Naprawa i modernizacja chłodni kominowych”, Bełchatów 1995.
- 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
- 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.
- Beyer H.A., 1990. Linejitter and geometric calibration of CCD-cameras. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 45, pp.17-32.
- Beyer H.A., 1992. Geometric and radiometric analysis of a CCD-camera based photogrammetric close-range system. Dissertation No, 9701, ETH Zurich.
- Claus M., 1988. Experiences with InduSURF in 3D measurement of industrial surfaces. Int.Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing, Kyoto, 27, B5, pp.119-129.
- Dold J., Maas H.G., 1993. An application of epipolar line intersection in a hybrid close-range photogrammetric system. Paper presented to the Symposium of ISPRS Commision V, March 1-4, 1994, Melbourn, Australia.
- Ebner H., Heipke C., 1988. Integration of digital image matching and object surface reconstruction. Int. Arch.Photogramm. Remote Sensing, Kyoto, 27, B11, pp.534-545.
- Gruen A., 1985. Adaptive least squares correlation: A powerful image matching technique. South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, 14, No 3, pp.175-187.
- Haggren H., Haajanen, L., 1990. Target search using template images. Int.Arch.Photogramm. Remote Sensing, Zurich, 28, 5/1, pp.572-578.
- Kempa M., Schluter M., 1993. DEM evaluation by an operator and facets stereo vision: A comparison based on close-range imagery. In Gruen/Kahmen (Eds.): Optical 3D-Measurement Techniques II, Wichmann Verlag, pp.502-509.

Maas, H.G., 1991. Automated surface reconstruction with structured light,. Int. Conference on Industrial Vision Metrology, Winnipeg, July 11-12, SPIE, Vol.1526, pp.70-77.

Maas H.G., 1992a. Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmesstechnik. Dissertation No. 9665, ETH Zurich.

Wrobel B., 1987. Facets stereo vision (FAST vision) - a new approach to computer stereo vision and to digital photogrammetry. Proceedings Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, Switzerland, June 2-4, pp.231-258.