

Jerzy Bernasik, Sławomir Mikrut

FOTOGRAMETRIA INŻYNIERYJNA

**Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska
Kraków 2007**

Od autorów

Przekazując „Fotogrametrię inżynierską” czytelnikom, winni jesteśmy krótkie wyjaśnienie. To monograficzne opracowanie miało służyć studentom jako podręcznik elementarny, ale w trakcie pisania postanowiliśmy rozszerzyć je o wyniki własnych prac badawczych.

Równocześnie – wykorzystując elektroniczną postać zapisu – zamierzamy permanentnie rozszerzać jego treść o istotne „nowości” – zarówno własne, jak i innych (chcących się włączyć) Autorów.

Mamy zatem nadzieję, że w tej formie opracowany i aktualizowany materiał będzie mógł być przydatny także fotogrametrom-profesjonalistom.

Spis treści

1. Informacje ogólne	
1.1. Charakterystyka i zastosowania fotogrametrii inżynierskiej	5
1.2. Dokładnościowe możliwości fotogrametrii inżynierskiej	7
1.3. Kierunki rozwoju fotogrametrii bliskiego zasięgu	9
2. Zdjęcia fotogrametryczne	
2.1. Kamery fotogrametryczne, zdjęcia pomiarowe i zasady wykonywania zdjęć	14
2.2. Błędy odwzorowania	15
2.2.1. Dystorsja obiektywu	15
2.2.2. Metody korekcji błędów dystorsji	16
2.2.3. Niepłaskość i nieprzyleganie materiału światłoczułego do ramki tłowej	17
2.3. Wyznaczanie poprawek do elementów orientacji kamer	18
2.3.1. Kalibracja kamer	18
2.3.2. Wyznaczanie poprawek rektyfikacyjnych fototeodolitu	19
2.3.2.1. Metoda sztucznego horyzontu	19
2.3.2.2. Wyznaczanie poprawek rektyfikacyjnych metodą zdjęć przeciwległych	21
2.4. Adaptacja niemetrycznej kamery cyfrowej do pomiarów inżynierskich	24
2.5. Sposoby pomiaru zdjęć w fotogrametrii inżynierskiej	25
2.5.1. Pomiar pojedynczych zdjęć i stereogramów	25
2.5.2. Pomiar par czasowych (pseudostereogramów)	26
3. Elementy fotogrametrii cyfrowej	
3.1. Wstęp	28
3.2. Cyfrowe rejestracje obrazów	28
3.2.1. Kamery cyfrowe	29
3.2.2. Skanery fotogrametryczne	32
3.2.2.1. Przygotowanie zdjęcia do skanowania	33
3.2.2.2. Proces skanowania	33
3.2.2.3. Archiwizacja i formaty danych cyfrowych	34
3.3. Pomiary obrazów cyfrowych	36
3.3.1. Fotogrametryczne stacje cyfrowe	36
3.3.2. Automatyzacja pomiaru na obrazach cyfrowych	38
3.3.2.1. Przegląd stosowanych algorytmów	45
3.3.2.2. Procedury automatyczne w autografii cyfrowym VSD	46
3.3.2.3. Wybrane przykłady ekstrakcji krawędzi z podpixselową dokładnością	47
3.4. Przykłady zastosowań fotogrametrii cyfrowej	49
4. Analityczne metody stosowane w fotogrametrii inżynierskiej	
4.1. Metody oparte na przekształceniu przez obrót	51
4.2. Metody wykorzystujące zależności rzutowe	53
4.3. Określanie przemieszczeń i odchyłków projektowych metodą różnicową	54
4.4. Oprogramowanie metod analitycznych stosowanych w fotogrametrii inżynierskiej	56

5. Metodyka pomiaru wybranych obiektów inżynierskich.	
5.1. Jednoobrazowa metoda pomiaru kształtu i badania odkształceń	59
5.1.1. Pomiary ugięć dźwigarów	59
5.1.2. Pomiary przekroji podziemnych metodą płaszczyzny światła	60
5.1.3. Cyfrowa technologia pomiaru przekrojów podziemnych	61
5.2. Pomiary wychyleń i badania odkształceń wysmukłych budowli	64
5.2.1. Wykonywanie zdjęć i ich pomiar	65
5.2.2. Obliczenia wychyleń i prezentacje wyników pomiaru	66
5.2.3. Pomiary odchylenia od pionowości z użyciem niemetrycznej kamery cyfrowej	68
5.2.4. Uwagi i informacje uzupełniające o pomiarach kominów przemysłowych	69
5.2.5. Badania odkształceń wież wiertniczych w trakcie próbnycch obciążeń	70
5.3. Określanie parametrów lin odciągowych	73
5.3.1. Fotogrametryczne określanie parametrów lin odciągowych	73
5.3.2. Automatyzacja badania naprężeń lin na drodze analizy obrazów cyfrowycch	76
5.3.3. Pionowanie masztów poprzez zmianę długości lin odciągowych	78
5.4. Pomiary obiektów powłokowych	79
5.4.1. Pomiary chłodni kominowych	79
5.4.2. Pomiary hal przemysłowych i widowiskowych	82
5.4.3. Pomiary kształtu reflektorów anten	84
5.5. Pomiary procesów szybkozmiennycch	85
5.6. Fotogrametria na kopalniach odkrywkowych	90
5.6.1. Określanie objętości urobku	91
5.6.2. Pomiary osuwisk	93
6. Ćwiczenia z fotogrametrii inżynierskiej	
6.1. Pomiar kształtu i wychylenia komina	96
6.2. Pomiar kształtu i odkształcenia więzara dachowego metodą jednoobrazową	96
6.3. Badanie odkształceń wież wiertniczych wywołanych ich obciążeniem	97
6.4. Wyznaczanie parametrów liny odciągowej	98
6.5. Wyznaczanie odchyłek projektowych chłodni kominowych	99
6.6. Pomiar wychylenia i zmiany wychylenia słupa	100
6.7. Pomiar przekroji podziemnych zarejestrowanych cyfrowo metodą „płaszczyzny światła”	102
6.8. Określanie objętości mas ziemnych	104
Literatura	111

1. Informacje ogólne

1.1. Charakterystyka i zastosowania fotogrametrii inżynierskiej

Mianem fotogrametrii inżynierskiej określa się zazwyczaj nietopograficzne zastosowania fotogrametrii bliskiego zasięgu (do 300 metrów) w budownictwie, inżynierii, przemyśle i górnictwie. Śledząc światowe zastosowania fotogrametrii inżynierskiej można zauważyć charakterystyczną różnicę w ich rozwoju: w Polsce przeważają zastosowania inżyniersko-budowlane, natomiast w krajach wysoko rozwiniętych dominują zastosowania przemysłowe (*ang. industrial photogrammetry*). Dla budowniczych statków kosmicznych, okrętów, samolotów i rakiet, fotogrametria stanowi ważne narzędzie kontroli wymiarów elementów przygotowanych do montażu, oraz pomiaru kształtu i odkształceń gotowych obiektów. Fotogrametria bywa także stosowana w przemysłach: samochodowym, nuklearnym i chemicznym.

W Polsce fotogrametria inżynierska stanowi metodę alternatywną dla geodezji inżynierskiej, zaś o wyborze jednej z tych dwóch technik decydują rozmaite czynniki: możliwości dokładnościowe, sprzętowe, kwalifikacje wykonawców itp. Problem wyboru - w przypadku konkretnego pomiaru - metody geodezyjnej czy fotogrametrycznej, pomaga rozstrzygnąć znajomość zalet i wad metody fotogrametrycznej.

Do najważniejszych zalet fotogrametrii zalicza się:

równoczesność fotograficznej rejestracji wszystkich szczegółów - ważną zwłaszcza przy badaniach odkształceń szybkozmiennych,

- skrócenie czasu prac polowych i przeniesienie większości prac do laboratorium - sprzyjające staranności pomiarów i zmniejszaniu kosztów osobowych,
- dokumentalną wartość fotogramu - nie jest on obciążony błędami obserwatora i nie można go sfalszować; to ostatnie nie zawsze jest prawdziwe w przypadku rejestracji cyfrowych,
- brak sygnalizacji punktów kontrolowanych nie stanowi przeszkody i nie obniża znacząco dokładności pomiaru przemieszczeń (niemożność przewidzenia miejsc wystąpienia deformacji zmusza geodetów do zakładania i pomiaru dużej liczby punktów kontrolowanych); wynika z tego kilka innych zalet:

- można mierzyć elementy niedostępne (z powodu temperatury, wysokiego napięcia, czy innych zagrożeń),
- pierwotne założenia pomiaru deformacji (wybór punktów kontrolowanych, dokładność itp.) można modyfikować, jeśli wstępna obserwacja fotogramów pozwoli zlokalizować odkształcenia.

W przypadku fotogrametrii cyfrowej dochodzą zalety wynikające z możliwości automatyzacji pomiaru, która nie tylko przyspiesza uzyskanie wyników, ale stwarza możliwość podwyższenia dokładności, drogą mało kłopotliwego zwiększenia liczby nadliczbowych obserwacji.

Słabości metod fotogrametrycznych wynikają z tego, że:

- wysoką dokładność pomiaru łatwiej jest osiągnąć za pomocą precyzyjnych instrumentów geodezyjnych, aniżeli stosując standardową aparaturę fotogrametryczną,
- opłacalność pomiaru fotogrametrycznego jest uzależniona od rozmieszczenia (skupienia) kontrolowanych punktów,
- opracowania fotogrametryczne są bardziej złożone od geodezyjnych i na ogół są droższe.

Wybór określonej metody fotogrametrycznej zależy od celu wykonywanych pomiarów, którym może być:

- inwentaryzacja obiektu 3D - sprowadzająca się do wyznaczenia współrzędnych przestrzennych (X, Y, Z) punktów kontrolowanych (najczęściej w celu określenia odchyłek projektowych),
- określenie niewielkich odchyłek od nieskomplikowanej postaci teoretycznej - od pionowości, prostoliniowości, poziomości, płaskości, itp,

- badania przemieszczeń i odkształceń.

Taki podział wynika ze specyficznych możliwości i środków upraszczających niektóre pomiary i opracowania w fotogrametrii bliskiego zasięgu - należą do nich: metoda jednoobrazowa, różnicowa metoda pomiaru i opracowania zdjęć (w tym sposób „par czasowych”), samokalibracyjne rozwiązania sieci wiązek oraz inne specyficzne metody, które będą omówione w dalszych rozdziałach. Najczęściej - celem pomiarów inżynierskich są badania stanu obiektu, mogące stanowić podstawę diagnozy technicznej, określającej dopuszczalność do eksploatacji lub warunki jej przedłużenia. Mogą to być zarówno jednokrotne pomiary, jak i okresowe pomiary odkształceń.

Pomiary powykonawcze poprzedzające oddanie do eksploatacji nowozbudowanego obiektu mają na celu określenie odchyłek projektowych. W przypadku pomiarów tego rodzaju, fotogrametria analogowa (oparta o zdjęcia fotograficzne) na ogół ustępuje metodom geodezyjnym. W dzisiejszych polskich warunkach wyszczególnione zalety fotogrametrii nie mają decydującego znaczenia, bo przygotowanie wykonawców i dokładnościowa przewaga precyzyjnych pomiarów geodezyjnych nabierają znaczenia rozstrzygającego. Elementem zmieniającym powoli istniejące relacje staje się fotogrametria cyfrowa. Wydaje się więc, że warto preferować metody geodezyjne w przypadku pomiarów jednokrotnych (zwłaszcza wymagających najwyższej dokładności), zaś fotogrametryczne - w przypadku pomiarów powtarzalnych (np. cykliczne badania odkształceń). W przypadku fotogrametrii cyfrowej, ograniczeniem jest brak kamer o rozdzielczości obrazu osiąganey na drodze analogowej, oraz ceny wysokorozdzielczych kamer cyfrowych.

Odbiorcami rezultatów pomiarów mogą być projektanci budowli i urzędów, inwestorzy, wykonawcy, nadzór techniczny, rzeczoznawcy budowlani oceniający stan budowli, lub użytkownicy obiektu.

W odróżnieniu od metod aerofotogrametrycznych, inżynierskie zastosowania fotogrametrii naziemnej mają na ogół charakter nietopograficzny - są to zwykle opracowania liczbowe ilustrowane metodami grafiki komputerowej. Względny dokładnościowy ograniczają stosowanie metod stereofotogrametrycznych - częściej stosuje się zdjęcia zbieżne, niejednokrotnie wykonywane z nadliczbowych stanowisk. Możliwość dokładnego określenia współrzędnych stanowisk i orientacji zdjęć narzuca odmienne (niż w aerofotogrametrii) metody opracowania.

Na nowoczesne instrumentarium fotogrametrii inżynierskiej składają się cyfrowe stacje fotogrametryczne (CSF) wraz ze specjalistycznym oprogramowaniem (autokorelacja, DLT, samokalibracja), wysokorozdzielcze kamery cyfrowe lub konwencjonalne (analogowe) kamery pomiarowe, stereokomparator precyzyjny, czy autograf analityczny.

Do najlepiej udokumentowanych, uzasadnionych zastosowań naziemnej fotogrametrii inżynierskiej w Polsce można zaliczyć:

- powykonawcze i okresowe pomiary „odchyłek projektowych” różnych budowli i urzędów,
- pomiary odkształceń dużych budowli inżynierskich i urzędów przemysłowych: chłodni kominowych, tam, statków w trakcie wodowania itp.,
- określanie kubatur urobku na kopalniach odkrywkowych i w kamieniołomach,
- badanie ugięć mostów, wiaduktów i elementów nośnych konstrukcji dachowych,
- pomiary odchylenia od pionowości obiektów wysmukłych (kominów, wież, masztów, słupów),
- badania odkształceń wież wiertniczych w trakcie próbnych obciążeń,
- wyznaczanie parametrów lin odciążowych,
- pomiary odkształceń modeli budowli.

Obecnie coraz rzadziej wykorzystuje się metody konwencjonalnej fotogrametrii analogowej, zastępując je fotogrametrią cyfrową, bądź analogowo-cyfrową; w tym drugim rozwiązaniu, pomiaru dokonuje się na obrazach cyfrowych uzyskanych drogą wysokorozdzielczego skanowania fotogramów. Pomiar współrzędnych i dalsze opracowanie analityczne są wykonywane w fotogrametrycznej stacji cyfrowej. Cyfrowe metody są stosowane w fotogrametrii przemysłowej przy

nadzorowaniu procesów produkcyjnych i zapewne znajdą wiele nowych zastosowań w innych dziedzinach. Skłania to do przypomnienia zalet fotogrametrii cyfrowej:

- umożliwia automatyzację pomiaru obrazów,
- stwarza szerokie możliwości przetwarzania obrazu, również w czasie rzeczywistym,
- ułatwia prace związane z rejestracją obrazu (kamery cyfrowe są lżejsze i niewielkie) i skraca czas pozyskiwania obrazu (odpada fotograficzna obróbka negatywów),
- ułatwia pomiary obiektów w ruchu i pomiary deformacji (również szybkozmiennych),
- umożliwia nadzorowanie procesów produkcyjnych i sterowanie nimi (robotyka),
- odpadają koszty materiałów światłoczułych i ich obróbki laboratoryjnej.

1.2. Dokładnościowe możliwości fotogrametrii inżynierskiej

Geodezyjnym odpowiednikiem większości metod stosowanych w fotogrametrii bliskiego zasięgu jest przestrzenne wcięcie w przód. Różnica polega jedynie (jak w całej fotogrametrii) na odmiennym określeniu przestrzennego kierunku promienia rzucającego - zamiast kątów (poziomych i pionowych) kierunek określają współrzędne tłowe (wraz z elementami orientacji zdjęcia). Relacje dokładnościowe pomiędzy różnymi metodami pomiarowymi (w tym metodą geodezyjną) najłatwiej zatem jest prześledzić przyjmując za wyróżnik błąd określenia kierunku. Stosując znane metody analizy dokładności wcięcia w przód, znając błąd określenia kierunku i kształt sieci pomiarowej, można przewidzieć dokładność wyników pomiaru (a priori).

Dokładność opracowania zależy od następujących czynników:

- poprawności rejestracji obrazu (zgodność z rzutem środkowym), kalibracji i rektyfikacji kamery,
- parametrów kamery (wpływających na skalę odwzorowania),
- kształtu sieci pomiarowej, liczby stanowisk (zdjęć) i uzbrojenia w punkty kontrolne,
- dokładności pomiaru współrzędnych tłowych,
- metody obliczenia wyników.

Na dokładność fotogrametrii rzutują ponadto zniekształcenia odwzorowania spowodowane przez:

- błędy orientacji i rektyfikacji kamer (których wpływ zmniejsza wykorzystanie punktów kontrolnych),
- błędy kalibracji kamery i powtarzalność rejestracji,
- niepłaskość powierzchni rejestrującej (matrycy CCD czy szkła płyt fotograficznych); wpływ tej niepłaskości wzrasta wraz z kątem widzenia kamery),
- tzw. zjawisko brzegowe, które w przypadku kontrastowego wywołania negatywu może spowodować znaczące przesunięcia niektórych fragmentów obrazu.

Aby ograniczyć wpływ niektórych z wymienionych czynników, nie stosuje się kamer szerokokątnych bez wyraźnej potrzeby i stosuje płyty fotograficzne ze szkła o wysokiej płaskości; czasem stosuje się kamery z płytami reseau¹. Wykorzystuje się punkty kontrolne - jeśli jakieś powody nie zmuszają do opracowania opartego o nominalne dane orientacji kamery. Przy zachowaniu tych warunków, można przyjąć za możliwą do osiągnięcia dokładność określenia współrzędnej tłowej rzędu 1 – 3 μm. Oznacza to, że stosując obiektyw o ogniskowej rzędu 200 mm, można określić kierunek z dokładnością 1" - 3", co wynika z zależności:

$$m_{\alpha} = \frac{m_x}{c_k} \cdot 206265'' \quad /1.1/$$

¹ Reseau – płyta szklana z naniesioną precyzyjnie wzorcową siatką kwadratów; umieszczana w płaszczyźnie tłowej kamery i odfotografowana na zdjęciu - ułatwia korekcję błędów odwzorowania.

Dokładności określenia współrzędnych X , Y , Z osiągalne w inżyniersko-przemysłowych pomiarach metodami fotogrametrii analogowej dobrze określa wzór [Fraser, 1988]:

$$M_{X,Y,Z} = m_{x,y} q m \quad /1.2/$$

gdzie: $m_{x,y}$ – błąd określenia współrzędnych tłowych,

m – mianownik skali obrazu,

q – współczynnik zależny od warunków fotogrametrycznego wcięcia w przód: od 2,5 – dla stereofotogrametrii, przez 1 – dla pojedynczego (dwustanowiskowego) wcięcia w optymalnych warunkach, do 0,4 – dla sieci wiązek rozwiązywanej metodą samokalibracji.

Tabela 1.1. Dokładności pomiarów uzyskiwane różnymi metodami fotogrametrycznymi.

Kamera, pomiar obrazu	Ogniskowa [mm]	Format [mm]	Śr. błąd wspł. tł. [μm]	Śr. błąd kierunku ["]
CRC-1, automat. monokomparator	240	230x230	0,5	0,4
UMK 20/1318 Autograf analit.	200	130x180	1,5	1,5
UMK 10/1318 Monokomp. RS-1	100	130x180	1,0	2,0
Hasselblad Autograf analit.	80	60x60	2,5	6,4
Kamera CCD Videk Megaplex, pom.1/50pix	20	9x7	0,3	3,1
DCS 200 – kam. cyfr. Stacja cyfrowa	28	27x18	0,4	3,3
a) Photho 19/1318 Skaner, VSD	195	130x180	4,5	6
b) Kodak DCS 760 – cyfr. Aut.pom.1/10 pixela	50	27x18	1,1	3,6

W przypadku fotografii cyfrowej, o dokładności decyduje w głównej mierze rozdzielczość geometryczna matrycy detektorów, wyrażana liczbą pikseli przypadających na cal. Dla nas ważna jest jednak nie tyle rozdzielczość geometryczna, ale rozdzielczość kątowna, będąca funkcją wymiaru piksela i odległości obrazowej. Dokładności współczesnych kątomierznych instrumentów są powszechnie znane - około 1". Analogiczna dokładność fotogrametrii analogowej (jak wynika z wcześniejszej analizy) kształtuje się na poziomie 3". Uzyskanie podobnej dokładności przy wykorzystaniu kamer cyfrowych nie jest aktualnie możliwe bez stosowania automatycznego pomiaru obrazu z podpikselową dokładnością (i to dokonując rejestracji kamerą wysokiej klasy). Obecnie jest to metoda coraz mniej kosztowna (cena wysoko rozdzielczej kamery i specjalistycznego oprogramowania). Często zachodzi konieczność stosowania specjalnej sygnalizacji punktów kontrolowanych (aby umożliwić automatyczny pomiar obrazów cyfrowych). Zaletą, która rekompensuje wymienione komplikacje jest łatwość zwiększania liczby spostrzeżeń nadliczbowych zautomatyzowanego pomiaru.

Dobłą ilustrację powyższych rozważań stanowi tabela 1.1 (zaktualizowana tabela Fräsera z 1988 roku); poziom dokładnościowy opracowań analogowych z przełomu lat 1980/1990 (pierwsze 5

pozycji) pozostał reprezentatywny do dziś, natomiast dokładności opracowań cyfrowych zwiększono za sprawą:

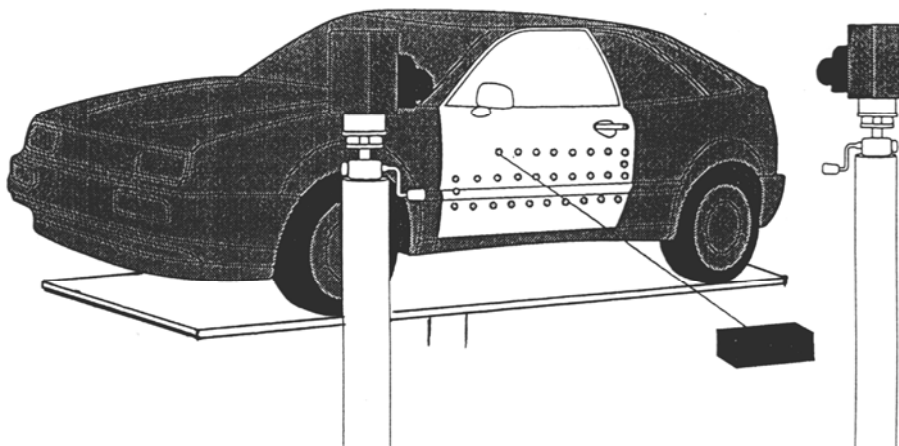
- podwyższenia poziomu osiąganego podpixelowej dokładności automatycznego pomiaru obrazów cyfrowych (dzięki specjalistycznemu oprogramowaniu osiąga się obecnie dokładność przekraczającą 1/50 piksela),
- udoskonalenia kamer cyfrowych i rozwoju cyfrowych stacji fotogrametrycznych, które przejęły funkcję podstawowego instrumentu pomiarowego.

1.3. Kierunki rozwoju fotogrametrii bliskiego zasięgu

Obrazem aktualnego stanu i kierunków rozwoju fotogrametrii bliskiego zasięgu w świecie są prezentacje Kongresów Międzynarodowego Towarzystwa Fotogrametrii i Teledetekcji (ISPRS). Ostatnie kongresy – w Wiedniu (1996), Amsterdamie (2000), Ankarze (2004) dostarczyły wielu informacji o najnowszych trendach i postępach w dziedzinie fotogrametrii bliskiego zasięgu. Problematykę tą koordynuje Komisja V, zajmująca się „technikami bliskiego zasięgu i sztucznym widzeniem”. W ramach działalności tej Komisji można wyróżnić następujące kierunki badań:

- * pomiary w zasięgach bliskim i mikro,
- * rejestracja i monitorowanie ruchu i deformacji obiektów,
- * systemy pomiarowe bliskiego zasięgu, optyczne i multisensoralne (automatyczna kalibracja i orientacja sensorów),
- * automatyczna analiza obrazów (matching, ekstrakcja cech),
- * modelowanie i odtwarzanie rzeczywistości 3D.

W ostatnim pięcioleciu można zauważyć bardzo szybki postęp w cyfrowej fotogrametrii bliskiego zasięgu. Opracowano systemy obrazowania w czasie rzeczywistym, a fotogrametria bliskiego zasięgu stała się powszechnie przyjętym narzędziem pomiarowym na takich obszarach zastosowań jak: metrologia przemysłowa, widzenie przez roboty, nauki medyczne, archeologia, architektura, czy szeroko rozumiana obsługa budowli.



Rys.1.1. Rejestracja karoserii samochodu umieszczonego na obrotowej platformie; raster jest rzutowany przez projektor

Na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat opracowano w świecie kilka metod, które stały się przełomowymi dla dalszych badań i zastosowań fotogrametrii inżynieryjno-przemysłowej. Opisany w roku 1988 InduSURF [Claus, 1988] - system stworzony do badań kształtu karoserii samochodowych -

umożliwia wielostanowiskowy, zautomatyzowany pomiar zdjęć stereoskopowych. Powierzchnie przygotowuje się do fotografowania przez narzucenie gęstej tekstury (za pomocą projektora). Ciekawym i zasługującym na kopiowanie, jest sposób dokonywania rejestracji: zamiast obierać wokół obiektu wiele stanowisk (wyznaczając ich współrzędne), ustawia się obiekt na obrotowej platformie, wykonując kolejne zdjęcia jedną kamerą – przy różnych, dokładnie znanych kątach skręcenia platformy (rys. 1.1). Do analitycznego opracowania wyników zastosowano program samokalibracji. Ważny rozdział w rozwoju fotogrametrii bliskiego zasięgu zapisał niemiecki fotogrametra Wester-Ebinghaus. Przedstawił on wnioski z zastosowania wielkoformatowej kamery z płytą „reseau” do wysokoprecyzyjnych pomiarów 3D [Wester-Ebinghaus, 1990]. Określił techniczne warunki osiągania dokładności pomiaru wyższej od 1:100000 rozmiarów obiektu: wielkoformatowe, długoogniskowe kamery, specjalne techniki sygnalizacji mierzonych punktów (retrorefleksyjne), podmikrometrowe dokładności pomiaru obrazów, „mocne” sieci fotogrametryczne, stosowanie samokalibracji. Wielkoformatowe kamery analogowe nie mogą jeszcze być zastąpione przez kamery cyfrowe z powodu małych formatów matryc CCD, oraz niewystarczającej rozdzielczości obrazów cyfrowych. Obrazy analogowe muszą być przetwarzane na cyfrowe, aby umożliwić automatyczny pomiar obrazu i osiągnięcie wysokiej dokładności.

Kontynuował ten wątek C.S.Fraser w swojej ważnej pracy pt. „Fotogrametryczne pomiary o dokładności 1:1000000” [Fraser, 1996], stwierdzając:

- fotogrametria jest techniką optycznej triangulacji; podstawą pomiaru są kierunki (tu – określane nie na podstawie pomierzonych kątów, ale na podstawie pomierzonych współrzędnych tłowych). Ażeby osiągnąć dokładność względną 1:500000 (stosunek błędu do rozmiarów obiektu) niezbędne jest określanie kierunku z dokładnością 1" (Amerykanie z tego względu stosowali bardzo drogie płyty fotograficzne ze szkła szlifowanego, o płaskości 3-5 μm),
- sięganie po takie dokładności jest uzasadnione jedynie w szczególnych przypadkach; zazwyczaj wystarcza dokładność względna 1:100000 do 1:200000, ale na przykład pomiar wielkiej anteny wymaga dokładności 1:1000000.

W przypadku fotogrametrii cyfrowej, osiągnięcie wysokich dokładności umożliwiają:

- wysokorozdzielcza, precyzyjnie skalibrowana kamera cyfrowa o wysokiej stabilności i powtarzalności rejestracji obrazu (lub wysokorozdzielczy skaner laboratoryjny do cyfrowego zapisu fotogramów),
- oprogramowanie umożliwiające automatyczny pomiar z podpikselową dokładnością, oraz optymalizujące obliczenia (np. program samokalibracji).

Większość prac poświęconych fotogrametrii bliskiego zasięgu ukazywała intensywne poszukiwanie metod spełniających warunki: dokładności, szybkości (RTP – *ang. real time photogrammetry*) i automatyzacji pomiaru.

W 1996 roku, na Kongresie w Wiedniu prezentowano już głównie cyfrowe zastosowania:

- Japończycy zaproponowali kompletny system do pomiaru powierzchni; składają się nań: dwie kamery cyfrowe na wspólnej bazie, projektor rzucający deseń teksturowy, stacja robocza wraz z oprogramowaniem kalibracji kamer. Pomiar wykonywany jest automatycznie; wszystkie wyniki uzyskuje się w postaci typowych zbiorów AutoCAD,
- Johnson szeroko opisał różne zastosowania fotogrametrii w przemyśle okrętowym, stwierdzając jej przewagę nad metodami konwencjonalnymi, zwłaszcza przy zastosowaniu techniki modelowania CAD i komputerowych wizualizacji wyników pomiaru,
- kilka prac poświęcono inwentaryzacji instalacji przemysłowych: stosując różne kamery CCD wraz z niezbędnym oprzyrządowaniem (karty *frame grabber*), stacjami roboczymi lub PC, uzyskiwano w czasie prawie rzeczywistym informacje z dokładnością wyższą od 1 mm, przy odległościach rzędu 4 m,

- Andre Streilein przedstawił nowy system pół-automatycznej wektoryzacji DIPAD; proces automatycznego pomiaru jest inicjowany w oparciu o przybliżony model istniejący w CAD. Operator zapewnia poprawne „rozumienie obrazu” zaś komputer przeprowadza automatyczny pomiar i zapewnia poprawne zarządzanie danymi. Automatyczny pomiar polega na analizie obrazów cyfrowych i wyodrębnianiu z nich linii rozgraniczających obszary różniące się jasnością obrazu.

Ten sam autor przedstawił interesujący przykład efektywnego stosowania bardzo prostych metod do pełnowartościowych pomiarów inwentaryzacyjnych. W ramach międzynarodowego eksperymentu pomierzył obiekt o wymiarach 15x8x10 m. Zastosował popularną video-kamerę (z zapisem na taśmie magnetycznej). Po zeskanowaniu obrazów obiektu, pomierzył je na ekranie monitora komputerowego (z funkcją Zoom). Uzyskał zadawalające dokładności (1,5 cm – przy zastosowaniu pre-kalibracji i 1cm – przy zastosowaniu samokalibracji); na ogół uzyskiwano w tym eksperymencie dokładności 1 – 2 cm. Na uwagę zasługiwały ponadto:

- rejestracje stanu szyn i wykrywanie defektów: przy szybkości podróży 20 km/godz stosowano liniową kamerę cyfrową wraz z szybkim transponderem danych, rejestrując z rozdzielczością 0,5 mm/linię,

- pomiar ruchu powierzchni skalnej pozbawionej naturalnej tekstury, przy wykorzystaniu kamery CCD i automatycznego pomiaru obrazu; zastosowano projektor laserowy (umieszczony – podobnie jak kamera – na zorientowanej lunecie geodimetru) rzucający na strop regularną siatkę punktów,

- do automatycznego monitoringu ruchu na skrzyżowaniu ulicznym wykorzystano kamerę video podczepioną do balonu na uwięzi; komputerowa analiza obrazu, automatyczne dopasowywanie do wzorca (*matching* oparty na korelacji obrazu) posłużyły do określania trajektorii pojazdów i ich prędkości,

- wiele prac poświęcono pomiarom obiektów dynamicznych (wibracje samochodu, deformacje łopatek wirnika, dynamiczne pola testowe i inne),

- zaprezentowano także wyniki pomiarów złożonej sieci instalacji w przemyśle chemicznym i nuklearnym [Kolondra, 1997].

W 2000 roku w Amsterdamie prezentacje zastosowań fotogrametrii bliskiego zasięgu zostały zdominowane przez problemy automatyzacji wszelkich faz fotogrametrycznego procesu, oraz przez rozwiązania sprzętowe nowej generacji: „inteligentne” kamery, czy nowe systemy wizyjne. Utrwaliły się trendy integracji nowoczesnych technik fotogrametrycznych ze środowiskiem CAD. Fotogrametria stała się akceptowanym narzędziem kontroli - w czasie rzeczywistym - przebiegu skomplikowanych procesów produkcyjnych w przemyśle: metalowym, elektronicznym, samochodowym, oraz w inżynierii. Została uznana za efektywną technikę pozyskiwania informacji 3D w procesach wspomaganego komputerowo projektowania, modelowania, kontroli produkcji i dokumentowania różnego rodzaju obiektów. Systemy CAD mogą być traktowane jako baza integrująca dane różnego typu i sposobu pozyskania. Ścisła integracja metod obrazowania i opracowania, przy wykorzystaniu współczesnych technik wspomaganego komputerowego środowiska CAD, powinna doprowadzić do istotnego rozszerzenia wachlarza przemysłowych i inżynierskich zastosowań fotogrametrii bliskiego zasięgu [Sawicki, 2000].

Kongres ISPRS w Stambule (2004) a także prezentacje kolejnego „tygodnia fotogrametrycznego” w Stuttgarcie ukazały dynamiczny postęp w rozwoju oprzyrządowania, oraz metod fotogrametrii bliskiego zasięgu.

Współczesna fotogrametria bliskiego zasięgu koncentruje swoje badania na metodach cyfrowych i „widzeniu maszyn” (może lepiej mówić o „sztucznym widzeniu”). Poświęca się wiele wysiłku na analizę obrazów w czasie rzeczywistym, automatyczną kalibrację i orientację sensorów, *matching* obrazów, ekstrakcję cech obiektu, modelowanie 3D. Najbardziej znaczącym postępem jest pomiarowe (3D) zastosowanie skanowania laserowego.

Całkowicie odmiennym od dotychczasowych - zastosowaniem techniki skanerowej - jest jej wykorzystanie do bezpośredniego 3D pomiaru obiektu [Ziajka, 2003]. Skanery laserowe służą do bardzo szybkiego, zdalnego pozyskiwania danych przestrzennych. Pracują one, wykorzystując laser impulsowy zintegrowany z kamerą cyfrową i komputerem. Dają one obecnie dokładne wyniki przy odległościach od 0.5 metra do około 100 metrów.

Sam proces pomiaru polega na wysyłaniu linii skanujących (*ang. scan lines*) do mierzonego obiektu, które skanują obiekt w kierunku pionowym. Uzyskuje się w ten sposób obraz zbioru punktów obiektu – „chmurę punktów” (*ang. point cloud*) - na ekranie komputera. Ten zbiór punktów jest graficzną reprezentacją setek tysięcy punktów odniesienia (*ang. reference points*), dla których znane są przestrzenne współrzędne x , y , z . Ściśle rzecz ujmując - współrzędne punktów uzyskane bezpośrednio z pomiarów są współrzędnymi biegunowymi (dwa kąty i odległość), transformowanymi później do układu kartezjańskiego. Pozyskane dane mogą być następnie wykorzystane do tworzenia modeli 3D obiektów, bądź dowolnych ich rzutów 2D, dając dokładność milimetrową.

Skanery laserowe stwarzają możliwość pomiaru około 800 punktów na sekundę, są więc niezwykle szybkim narzędziem do pozyskiwania danych, pomiary mogą być wykonywane zarówno w dzień, jak i w nocy – skaner nie ma specjalnych wymagań co do warunków oświetleniowych ani pogodowych. Skanowanie laserowe stwarza możliwość tworzenia modeli 3D dużych obiektów o bardzo skomplikowanej strukturze.

Zasadniczym problemem (opracowania danych pomiarowych) jest sposób powiązania „chmury punktów” z pomiarów z lokalnym układem współrzędnych; odbywa się to na bazie co najmniej trzech punktów kontrolnych i sprowadza do matematycznej transformacji z jednego układu do drugiego.

Opracowanie danych pomiarowych ze skanera umożliwia oryginalne oprogramowanie. Warto zwrócić uwagę na to, że przy wykonywaniu pomiarów skanerem laserowym, obszary z elementami, które nie są przedmiotem pomiarów (ruch samochodowy i pieszy na ulicach, krzaki), nie stwarzają problemu. Surowe dane pomiarowe są odpowiednio opracowywane w celu uczynienia obrazu; można wtedy usunąć informacje nieistotne.

Pojedyncze „skany” łączy się zwykle ze sobą, by pokazać obraz większych obszarów, czy obiektów. Na oryginalne dane ze skanera można nałożyć siatkę o dowolnym rozmiarze i uzyskać zbiór punktów ze współrzędnymi naroży tej siatki, bądź też automatycznie wygenerować warstwicę na wskazanym obszarze.

Możliwe jest również inne modelowanie danych. Efektem finalnym może być gładki, barwny obraz mierzonego obiektu, powstały poprzez pokrycie teksturą powierzchni utworzonej przez szkielet punktów.

Dane ze skanera mogą być również eksportowane do programów typu CAD (np. MicroStation[®], AutoCAD[®]) celem dalszej ich obróbki w zależności od założeń wykonywanego projektu. Możliwe będzie więc opracowanie kompletnego modelu 3D, który pozwoli na wirtualny przelot (*ang. fly-through*) przez obiekt taki jak budynek, jaskinia itp. Skanowanie laserowe stwarza możliwość szybkiego pomiaru elementów konstrukcyjnych, a następnie ich przestrzennej wizualizacji. Wykorzystując oprogramowanie skanera, poszczególne punkty należy przekonwertować do obiektów geometrycznych takich jak konkretne elementy konstrukcyjne.

Wśród szerokiej gamy zastosowań skanera laserowego warto wymienić kilka z dziedziny pomiarów inżyniersko-przemysłowych, z zaznaczeniem jego zalet w poszczególnych przypadkach.

Tworzenie cyfrowych modeli 3D obiektów o skomplikowanej konstrukcji - końcowy model konstrukcji obiektu daje dokładne informacje o jego geometrii przestrzennej, umożliwiając dowolną wizualizację zarówno 3D jak i 2D całego obiektu czy wybranych jego fragmentów.

Pomiary rurociągów - zastosowanie skanera laserowego znacznie zmniejsza nakład prac i to zarówno terenowych jak i kameralnych. Pomiar skanerem wzdłuż rurociągu dostarczy danych do wygenerowania dokładnego, kartometrycznego przebiegu przestrzennego rur.

Pomiary pod projekt poszerzenia dróg - ważna jest w tym wypadku możliwość wykonania pomiarów bez konieczności blokady ruchu samochodowego. W przypadku modernizacji dróg aktualnie użytkowanych, wystarczy wykonać pomiary skanerem wzdłuż wybranego odcinka drogi ze stanowisk odległych o kilkadziesiąt metrów; wyniki pomiarów następnie łączy się w jeden ciągły obszar, za pomocą oprogramowania współpracującego ze skanerem. W kolejnym etapie tworzony jest kompletny model powierzchni drogi i obszarów przyległych. Po wyeksportowaniu do dowolnego programu (np. AutoCad® MicroStation®) będzie on potrzebny do wykonania końcowego projektu modernizacji drogi. Zwrócić należy uwagę na konieczność usunięcia informacji zbędnych, takich jak pomierzone przypadkowo pojazdy na drodze, co jest możliwe choćby przy wykorzystaniu oprogramowania dostępnego wraz ze skanerem.

Pomiary inwentaryzacyjne i badania odkształceń mostów – wymienione wcześniej zalety skaningu laserowego uzasadniają jego stosowanie.

Obliczanie kubatur obiektów – wykonuje się pomiary w kilku położeniach skanera, co daje bardzo zagęszczoną siatkę punktów. Następnie pomiary te łączone są ze sobą, a pomierzone punkty służą do utworzenia modelu 3D analizowanego obiektu. Przy wykorzystaniu odpowiedniego oprogramowania możliwe jest wykonanie numerycznego modelu danego obiektu i wykonywanie na nim licznych analiz takich jak przekroje i właśnie obliczenie objętości. Możliwe jest automatyczne opracowania wyników pomiarów (niemal on-line) - natychmiastowe określenie objętości nasypów ziemi czy brył skalnych.

Tworzenie wysokościowego modelu terenu. Przykładem może być przygotowanie dokładnego modelu wysokościowego terenu pod budowę zapory. Tradycyjne metody wiążą się z pracochłonną, mozolną niwelacją terenu, i późniejszym opracowaniem modelu wysokościowego. Dokładność i zagęszczenie punktów pomiarowych jest łatwiejsze do uzyskania niż metodą niwelacji technicznej; zwłaszcza biorąc pod uwagę możliwość pomiaru terenu niedostępnego (wysokogórski, bagnisty, osuwiskowy itp.).

Nie rozstrzygając drugorzędnej kwestii zaklasyfikowania skaningu laserowego, można stwierdzić, że skanery laserowe stanowią jeszcze jeden - obok geodezyjnych i fotogrametrycznych - sposób pomiaru obiektów inżynierskich. Skanery laserowe zdają się łączyć zalety obu tych metod. W wyniku pomiaru uzyskać można informacje o geometrii całego obiektu, czy też wykonać przekrój w dowolnym miejscu, a jednocześnie dostajemy zdjęcie cyfrowe mierzonego obiektu. Sam pomiar natomiast nie wymaga bezpośredniego kontaktu z obiektem, czy wcześniejszej sygnalizacji punktów.

2. Zdjęcia fotogrametryczne

Współczesna fotogrametria inżynierska - o czym była już mowa - to fotogrametria cyfrowa. Nie oznacza to jednak całkowitego odrzucenia konwencjonalnych (fotograficznych) metod rejestracji obrazów. Zwłaszcza że dysponując wysokorozdzielczymi skanerami, można z powodzeniem stosować metody fotogrametrii cyfrowej, opracowując zeskanowane zdjęcia wykonane kamerami metrycznymi. W tym rozdziale zostaną podane wiadomości o wykonywaniu i pomiarze zdjęć pomiarowych, stanowiące uzupełnienie wiedzy wyniesionej z podstawowego kursu fotogrametrii.

2.1. Kamery fotogrametryczne, zdjęcia pomiarowe i zasady wykonywania zdjęć

Do najczęściej używanych w Polsce analogowych kamer naziemnych należały zeissowskie: Photheo 19/1318 i UMK 10/1318; obecnie najczęściej wykorzystuje się kamery cyfrowe, bądź skanuje się zdjęcia wykonane metrycznymi kamerami analogowymi. Ze względów dokładnościowych preferuje się długoogniskowe, wielkoformatowe kamery metryczne, ale w uzasadnionych przypadkach stosuje się kamery szerokokątne, stereometryczne, szeregowo, kamery z płytami „reseau”, oraz kamery niometryczne (cyfrowe, analogowe fotograficzne albo filmowe). Kamery metryczne gwarantują stałość elementów orientacji wewnętrznej a zdjęcie metryczne stanowi rzut środkowy fotografowanego przedmiotu. Stopień powtarzalności elementów orientacji zależy od konstrukcji kamery. Głównymi czynnikami naruszającymi metryczność są: niewystarczająca stałość odległości obrazowej, dystorsja obiektywu, niepłaskość materiału fotograficznego, oraz zniekształcenia obrazu powstałe w trakcie obróbki laboratoryjnej. Zostaną one omówione w następnych podrozdziałach.

Na poprawność określenia współrzędnych tłowych znacząco wpływa jakość fotograficzna i poprawność fotogrametryczna wykonania oraz wywołania zdjęć. Należy więc – w przypadku zdjęć analogowych:

- właściwie dobierać materiał negatywowo - najczęściej będą to niskoczule, wysokorozdzielcze, ortochromatyczne płyty fotograficzne,
- poprawnie naświetlać zdjęcia: używając światłomierza należy określić czas ekspozycji, uwzględniając barwę obiektu i barwoczułość materiału światłoczułego, porę fotografowania, oraz kąt między kierunkiem fotografowania a kierunkiem padania światła,
- prawidłowo wywoływać negatywy, unikając w szczególności wywoływania nadmiernie kontrastowego i ciemnego (o nadmiernym zaczernieniu) - jako przyczyniających się do potęgowania zjawiska „brzegowego” emulsji fotograficznej,
- umiejętnie dobierać stanowiska kamer, upewniając się przed ekspozycją, czy wszystkie punkty kontrolne zostaną sfotografowane, zaś w przypadku zdjęć bez punktów kontrolnych - szczególnie starannie poziomując libelle i nadając kamerze założoną orientację.

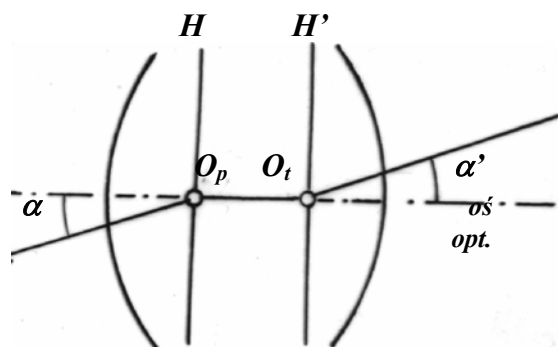
Zasady wykonywania zdjęć dla opracowań inżynierskich często różnią się od typowych zdjęć stereofotogrametrycznych - wysokie wymagania dokładnościowe zmuszają do stosowania wielostanowiskowych zdjęć zbieżnych. Zazwyczaj (choć nie zawsze) zdjęcia są uzbrojone w punkty kontrolne. Liczba i rozmieszczenie punktów kontrolnych zależy od zastosowanej metody analitycznego opracowania zdjęć a więc od liczby wyznaczanych (lub korygowanych) elementów orientacji wiązki promieni. Największa liczba punktów kontrolnych jest niezbędna w przypadku opracowania opartego o przestrzenną transformację DLT; nie potrzeba jednak wtedy wyznaczać współrzędnych stanowisk. Najmniej punktów kontrolnych wymaga metoda samokalibracji. Niezależnie jednak od metody obliczeń, należy dążyć do tego, aby w każdym przypadku móc korzystać z obserwacji nadliczbowych, umożliwiających przeprowadzenie procesu wyrównania i oszacowanie błędów wyznaczenia niewiadomych.

Kątowe elementy orientacji zewnętrznej kamery znany w chwili jej orientacji na stanowisku pomiarowym, lub możemy je poznać później (dzięki punktom kontrolnym), natomiast elementy orientacji wewnętrznej (stałą kamery i współrzędne punktu głównego), oraz rozmiary błędów zniekształcających odwzorowanie, określa się – jak wiadomo - w procesie znanym jako kalibracja kamery. Będzie o tym mowa w kolejnych rozdziałach.

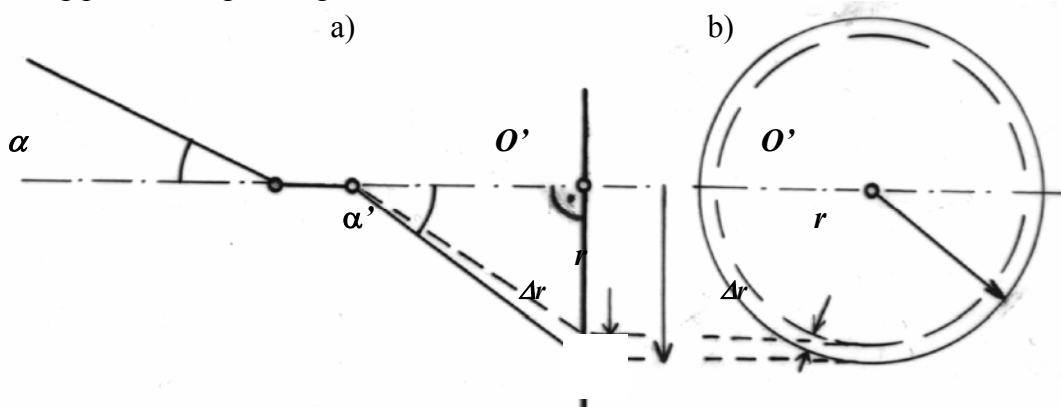
2.2. Błędy odwzorowania

2.2.1. Dystorsja obiektywu

Dystorsja obiektywu powoduje, że wiązka promieni skupiona w *przedmiotowym punkcie węzłowym obiektywu* O_p nie jest identyczna z wiązką wychodzącą z *obrazowego punktu węzłowego obiektywu* O_t (rys. 2.1). Pozbawione dystorsji są obiektywy symetryczne, ale projektanci obiektywów odступują od tego założenia, dążąc do optymalnego ograniczenia wszystkich rodzajów zniekształceń obrazu (aberracji). W praktyce nie spotyka się więc obiektywów całkowicie pozbawionych dystorsji, a jedynie układy o dystorsji ograniczonej do pewnego minimum. Dystorsja obiektywów współczesnych kamer fotogrametrycznych nie przekracza kilku mikrometrów.



2.1. Obiektyw i jego elementy: oś optyczna, płaszczyzny główne (H, H'), punkty węzłowe (O_p, O_t), oraz przebieg promienia głównego



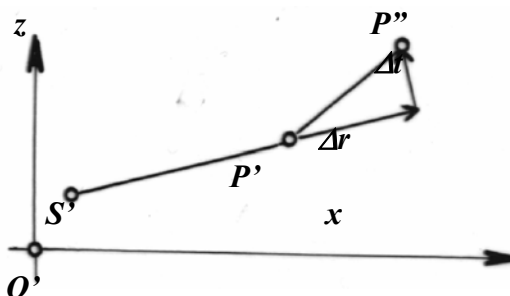
Rys. 2.2. Błąd odwzorowania punktu (Δr) spowodowany dystorsją radialną obiektywu: a) w płaszczyźnie osi kamery, b) w płaszczyźnie obrazu.

W przypadku obiektywu bezbłędnie zcentrowanego, przy ścisłej prostopadłości płaszczyzny tłowej do osi optycznej obiektywu, mamy do czynienia z *dystorsją radialną* - symetryczną względem punktu głównego O' . Oznacza to, że wszystkie punkty odwzorowane w takiej samej odległości (r) od O' są przesunięte radialnie o taką samą wielkość - Δr (rys. 2.2) . Kątowa wartość dystorsji radialnej $\Delta\alpha$,

będąca różnicą między kątem α - odchylenia promienia wchodzącego do obiektywu od osi optycznej i kątem α' - odchylenia promienia wychodzącego, jest wielkością stałą dla danego obiektywu i danego kąta α (rys.2.2a). W płaszczyźnie tłowej można zaobserwować liniową wielkość dystorsji Δr (rys. 2.2b)

Rys.2.16 Obiektyw i jego elementy: oś optyczna, płaszczyzny główne (H, H'), punkty węzłowe (O_p, O_t), oraz przebieg promienia głównego

W praktyce - z powodu niecentrycznego usytuowania soczewek i nieprostokątności płaszczyzny tłowej względem osi optycznej - kierunek wektora dystorsji nie przechodzi przez O' (rys.2.3). Błąd dystorsji określają wtedy dwie składowe: *radialna* (Δr) - w kierunku radialnym i *tangencjalna* (Δt) - w kierunku prostopadłym do radialnego. Wobec zaburzenia symetrii dystorsji, punkt główny O' przestaje być punktem centralnym (radialnym). Do szczegółowych analiz przyjmuje się wtedy *punkt najlepszej symetrii dystorsji* S' - względem którego symetria składników dystorsji jest najlepsza. We współczesnych obiektywach fotogrametrycznych odległość $O'S'$ jest mniejsza od 0,01 mm, a wielkość składnika tangencjalnego nie przekracza 3 μm .



Rys. 2.3. Rozkład wektora dystorsji na składowe: radialną (Δr) i tangencjalną (Δt)

2.2.2. Metody korekcji błędu dystorsji

Poprawienie współrzędnych tłowych punktu na zdjęciu ze względu na błąd dystorsji można przeprowadzić różnymi sposobami:

- metodą interpolacyjną,
- metodą tabelaryczną,
- metodą wielomianową.

Metoda interpolacyjna jest często stosowana do korygowania dystorsji *radialnej*. Tworzy się tabelę wartości promieni radialnych i odpowiadających im wartości dystorsji. Dla danej wielkości promienia radialnego (r) wartość dystorsji Δr jest interpolowana z dwóch pól tabeli, pomiędzy którymi mieści się wartość r .

Metoda tabelaryczna zakłada, że w pewnych elementarnych fragmentach obrazu (np. w kwadratach o wymiarach 5x5 mm) wartość dystorsji jest stała. Poprawienie współrzędnych punktu o błąd dystorsji (*radialnej i tangencjalnej*) polega na odszukaniu odpowiedniego pola tabeli (stosownie do współrzędnych tłowych punktu) i znalezieniu właściwych poprawek (radialnej i tangencjalnej) do współrzędnych tłowych.

Metoda wielomianowa jest najdokładniejsza. Z różnych postaci, które może przyjmować wielomian przybliżający rozkład dystorsji, najpopularniejsza jest postać wielomianu:

$$\Delta x = \frac{x}{r} \{ (k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 + \dots) + [(r^2 + 2x^2) p_1 + 2xz p_2] (1 + p_3 r^2 + \dots) \}$$

/2.1/

$$\Delta z = \frac{z}{r} \{ (k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 + \dots) + [2xzp_1 + (r^2 + 2z^2) p_2] (1 + p_3 r^2 + \dots) \}$$

gdzie : Δx , Δz - poprawki do współrzędnych tłowych x , z ze względu na dystorsję obiektywu,

$$r = \sqrt{x^2 + z^2} \text{ - promień radialny mierzony od punktu głównego O' ,}$$

k_1 , k_2 , k_3 - współczynniki składnika radialnego dystorsji symetrycznej,

p_1 , p_2 , p_3 - współczynniki składnika tangencjalnego dystorsji wraz z asymetrią dystorsji radialnej.

Są to wielomiany o nieskończonej liczbie wyrazów, ale wystarcza ograniczenie do k_3 i do p_2 .

Dystorsji obiektywu kamery pomiarowej nie można rozpatrywać w oderwaniu od wielkości stałej kamery; obie wielkości są wzajemnie powiązane funkcyjnie, dlatego też wartość c_k i poprawki dystorsji wyznacza się w procesie kalibracji kamery równocześnie:

$$\Delta r = r - c_k \operatorname{tg} \alpha \quad /2.2/$$

gdzie: r - promień radialny,

c_k - stała kamery,

α - kąt objaśniony na rysunku 2.2.

Kalibrowana odległość obrazowa czyli najwłaściwsza odległość obrazowa, jest obliczana jako odległość obrazowa minimalizująca poprawki dystorsji dla całego pola obrazu.

Względność dystorsji wiąże się także z zależnością współczynnika załamania światła od długości fali światła rejestrowanego przez emulsję światłoczułą; mamy więc do czynienia z odpowiadającą jej dystorsją i odległością obrazową. I tak na przykład dystorsję i c_k określone dla światła żółtozielonego (reprezentującego środek zakresu promieniowania widzialnego) trzeba skorygować w przypadku fotografowania w zakresie podczerwieni. Zatem dla konkretnego obiektywu (danej kamery) możemy mieć różne elementy orientacji wewnętrznej (i dystorsję) w zależności od typu emulsji i składu spektralnego światła.

2.2.3. Niepłaskość i nieprzyleganie materiału światłoczułego do ramki tłowej

Błędy niepłaskości materiału negatywowego mogą być przyczyną trudnych do określenia i eliminacji błędów opracowania. Zależą one od jakości i grubości szkła (lub wypłaszczenia błony), równego rozproszczenia emulsji, deformującego wpływu sprężyn kaset i działania urządzenia dociskającego materiał do ramki tłowej.

Stosowane w Polsce – coraz rzadziej - klisze są wykonane ze szkła „maszynowego” o grubości 1,6 mm a ich nierówności dochodzą do 40 μm . Są to nierówności niedopuszczalne przy dokładnych opracowaniach, ale płyty fotograficzne o niepłaskościach rzędu kilku mikrometrów (wykonane na szlifowanym, grubszym szkłe) są trudnodostępne i drogie.

Należy pamiętać, że szczególnie wysokie wymagania płaskości materiału i jego dociśnięcia do ramki tłowej stawiają kamery szerokokątne. Wpływ odchylenia powierzchni emulsji od płaszczyzny tłowej Δs (bez względu który z dwóch wymienionych czynników je spowodował) wynosi:

$$\Delta x = \frac{x}{c_k} \Delta s \quad \Delta z = \frac{z}{c_k} \Delta s \quad /2.3/$$

Wpływ niedociśnięcia kliszy eliminuje się częściowo w trakcie korekcji błędów orientacji zewnętrznej (na podstawie punktów kontrolnych). Podobny rezultat można uzyskać na drodze rzutowego przekształcenia „płaszczyzny punktów” pomierzonych na zdjęciu w oparciu o co najmniej 4 znane punkty ramki tłowej (na zdjęciu i na etalonie); poza znaczkami tłowymi można wykorzystywać dodatkowe punkty (np. nacięte na ramce tłowej). Etalon (wzorzec) naświetla się na płycie fotograficznej o wysokiej płaskości położonej na poziomej ramce tłowej. Przekształcenie rzutowe układów płaskich (rozdz. 4.2) pozwala obliczyć poprawne współrzędne tłowe:

$$x = \frac{ax' + bz' + c}{dx' + ez' + 1} \quad /2.4/$$

$$z = \frac{fx' + gz' + h}{dx' + ez' + 1}$$

gdzie:

$a \dots h$ – współczynniki przekształcenia rzutowego,
 x', z' - współrzędne przekształcane,
 x, z – współrzędne po przekształceniu rzutowym.

Trzeba pamiętać, że podstawę korekcji tego rodzaju mogą stanowić jedynie obrazy znaczków tłowych naświetlonych promieniami które przeszły przez obiektyw - nie mogą np. być wykorzystane znaczki naświetlone przez system elektryczny; ortogonalne odwzorowanie znaczków tłowych naświetlonych przez system elektryczny jest praktycznie niezależne od niewielkich wad przylegania płyty fotograficznej do ramki tłowej – nie może więc dostarczyć informacji o tej wadzie odwzorowania.

2.3. Wyznaczanie poprawek do elementów orientacji kamer

2.3.1. Kalibracja kamer

Istotą pomiaru fotogrametrycznego jest precyzyjne geometryczne odtworzenie wiązki promieni rzucających, zarejestrowanych w postaci obrazu. Kamera pomiarowa powinna być sprawdzana co jakiś czas, jak każdy inny instrument pomiarowy, w celu kontroli czy nie nastąpiła zmiana elementów orientacji wewnętrznej kamery, odpowiedzialnych za poprawną rekonstrukcję wiązki. Obywa się to w procesie tzw. kalibracji kamery. Kalibracja kamer fotogrametrycznych ma na celu wyznaczenie następujących elementów:

- stałej kamery (c_k),
- położenia punktu głównego w układzie łącznic znaczków tłowych (x_0, z_0),
- dystorsji obiektywu,
- zdolności rozdzielczej obiektywu,
- współrzędnych znaczków tłowych.

Dodatkowo, jeśli kamera zawiera siatkę reseau, określone powinny być również współrzędne siatki w układzie łącznic znaczków tłowych. Metody kalibracji kamer fotogrametrycznych dzielą się na laboratoryjne i polowe.

Metody laboratoryjne oparte są na wykorzystaniu kalibratorów wielokolimatorowych. Kalibrator składa się z dwóch, czterech lub większej liczby rzędów kolimatorów. Szerszy opis można znaleźć w literaturze [Sitek, 1991].

Metody polowe wymagają specjalnego pola testowego. W zależności od sprawdzanych elementów dobiera się odpowiednio rozmieszczone punkty pola testowego.

W przypadku kamer niemetrycznych elementy orientacji oraz ich stabilność bada się w procesie samokalibracji. Przez stabilność obrazu należy rozumieć jego powtarzalność geometryczną przy rejestracji nieruchomą kamerą bez zmiany ogniskowania. W aparatach cyfrowych rolę znaczków tłowych kamer fotogrametrycznych spełniają narożniki zdjęcia cyfrowego, względem których określa się położenie środka rzutów. Wymiar matrycy CCD jest znany, więc znane są współrzędne narożników zdjęcia. Stałą kamery wyraża się w pikselach.

Proces samokalibracji odbywa się poprzez wykonywanie zdjęć na specjalnie przygotowanym polu testowym. W polu tym sygnalizowane są punkty (pomierzone wcześniej metodą geodezyjną), w celu wyznaczenia przestrzennych współrzędnych X, Y, Z . Punkty te powinny być rozmieszczone równomiernie w zakresie pola widzenia obiektywu. Ma to szczególnie duże znaczenie przy wyznaczaniu wielomianu dystorsji, gdzie punkty powinny być rozmieszczone gęsto i równomiernie na roboczej powierzchni obrazu. Prawidłowość przeprowadzonej kalibracji można sprawdzić obliczając współrzędne fotopunktów i porównując je z pomierzonymi programem pozwalającym na obliczenie elementów orientacji (np. ORIENT, opracowany na Uniwersytecie Technicznym w Wiedniu).

2.3.2. Wyznaczanie poprawek rektyfikacyjnych fototeodolitu

Większość zagadnień pomiarowych zaliczanych do fotogrametrii inżynierskiej jest rozwiązywana metodami analitycznymi. Ze względów dokładnościowych najczęściej stosuje się *zdjęcia zbieżne* - jako stwarzające najlepsze warunki fotogrametrycznego wcięcia w przód; zdjęcia stereofotogrametryczne ograniczają możliwości osiągnięcia wysokich dokładności. Naziemne kamery pomiarowe (w porównaniu z lotniczymi) umożliwiają wprawdzie stosunkowo dokładne nadawanie założonej orientacji zewnętrznej, ale często jest to dokładność niewystarczająca. W tych przypadkach jesteśmy zmuszeni do *wyznaczania*, bądź co najmniej *korekty* nominalnych elementów orientacji kamery. Przyjęty sposób przejścia od współrzędnych tłowych do terenowych wpływa na sposób uzbrojenia zdjęć w punkty kontrolne, zaś w przypadku zdjęć nieuzbrojonych w punkty kontrolne stwarza konieczność *rektyfikacji* kamery i zachowania szczególnej staranności przy jej orientacji.

Pod określeniem *rektyfikacja kamery* rozumie się takie skorygowanie położenia libel i nasadki orientującej, aby spełnione były następujące warunki:

a) przy spoziomowanych libelach:

- ramka tłowa jest pionowa (lub nachylona nominalnie),
- linia łącząca boczne znaczki tłowe jest pozioma (albo: łącznica znaczków pionowych wyznacza ze środkiem rzutów płaszczyznę pionową),

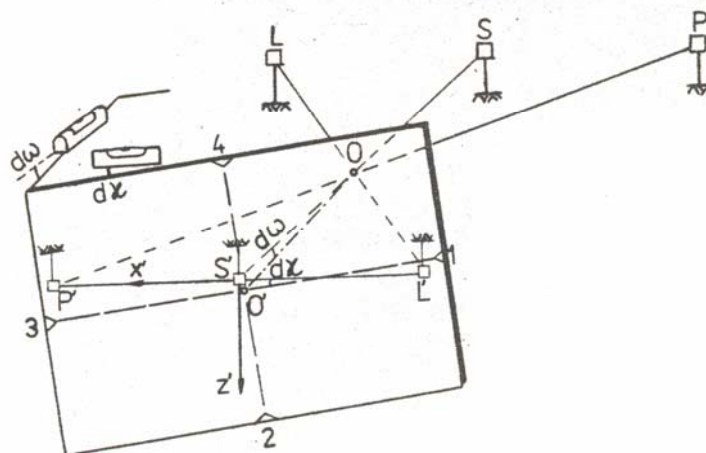
b) przy odczycie 0° na limbusie koła poziomego, oś kamery leży w płaszczyźnie kolimacyjnej nasadki orientującej (albo - jak w kamerze UMK – bez względu na nastawiony odczyt).

Poprawki rektyfikacyjne wyznacza się w celu doprowadzenia instrumentu do spełnienia wymienionych warunków, albo w celu wykorzystania tych wielkości w późniejszych obliczeniach. Można je wyznaczyć różnymi sposobami, opisanymi szczegółowo w literaturze [Bernasik, Tokarczyk, 1991]; dwie z nich – proste metodycznie i dokładne - zostaną omówione.

2.3.2.1. Metoda sztucznego horyzontu

Wyznaczanie poprawek rektyfikacyjnych metodą *sztucznego horyzontu kamery* jest oparte - jak to pokazuje rys. 2.4 - o pole testowe składające się z trzech sygnałów (L, S, P) wtyczonych w poziom środka rzutów kamery, przy czym oś celowa urządzenia orientującego jest skierowana na sygnał S

(przy odczycie 0°). W celu wtyczenia sygnałów w poziom środka rzutów, wykorzystuje się niwelator precyzyjny.



Rys. 2.4. Pomiar współrzędnych tłowych punktów pola testowego; klisza jest widoczna od strony szkła

Zdjęcia poziome tego pola testowego mierzy się w CSF lub na stereokomparatorze w układzie x', z' pokazanym na rysunku 2.4. Wyznacza się poprawki:

- libeli równoległej do ramki tłowej (κ),
- libeli prostopadłej do ramki tłowej (ω),
- nasadki orientującej (φ).

Poprawki rektyfikacyjne oblicza się wg. wzorów:

$$\kappa = \frac{z_1' - z_3'}{x_3' - x_1'} \quad /2.5/$$

lub

$$\kappa = \frac{x_2' - x_4'}{z_2' - z_4'} \quad /2.6/$$

$$\omega = \frac{z_1' + z_3' - 2z_0}{2c_k} \quad /2.7/$$

$$\varphi = \frac{x_2' + x_4' - 2x_0}{2c_k} \quad /2.8/$$

gdzie x_0, z_0 - współrzędne punktu głównego w układzie znaczków tłowych (zaliczane do elementów orientacji wewnętrznej); wymóg znajomości x_0, z_0 stanowi mankament metody. Wyznaczone poprawki można wykorzystać w trakcie rektyfikacji kamery (libel i nasadki orientującej), albo w trakcie obliczeń.

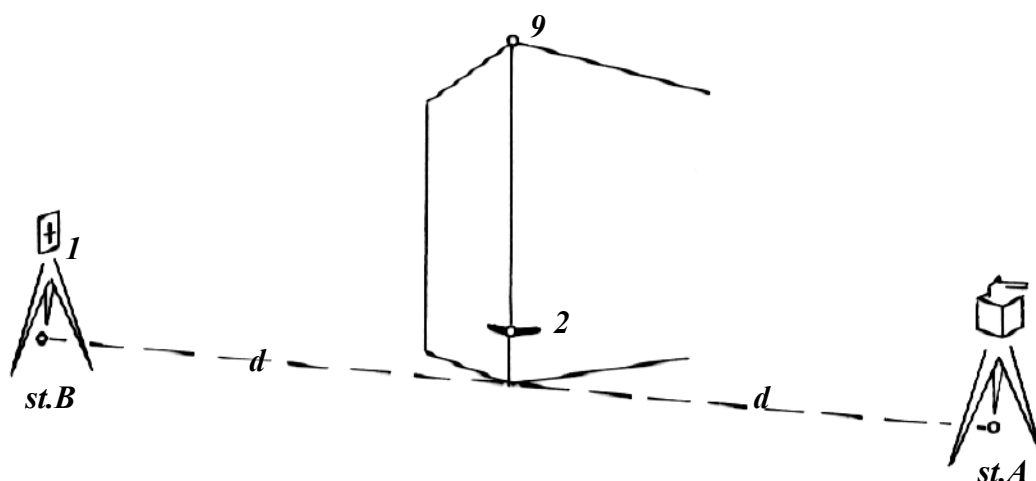
Inaczej wyznacza się poprawki rektyfikacyjne sposobem zdjęć przeciwległych, opisanym w następnym rozdziale; nie jest wtedy potrzebny niwelator, nie trzeba wieszać pionów a czasem zbędna jest też pomoc drugiej osoby.

2.3.2.2. Wyznaczanie poprawek rektyfikacyjnych metodą zdjęć przeciwległych

Zdjęcia „przeciwległe” (rys. 2.5) mogą stanowić podstawę wyznaczenia poprawek rektyfikacyjnych nie tylko w przypadku fototeodolitu, ale również w przypadku oprzyrządowanego aparatu fotograficznego (także cyfrowego), który - dzięki libellom i lunecie – można orientować w przestrzeni. Przybliżone kąty orientacji kamery należy skorygować, dodając odpowiednie poprawki rektyfikacyjne według wzorów 2.9:

$$\begin{aligned}\omega &= \omega_o + d\omega \\ \kappa &= \kappa_o + d\kappa \\ \varphi &= \varphi_o + d\varphi\end{aligned}\quad /2.9/$$

Zdjęcia wykonuje się z dwóch przeciwległych stanowisk (na rys. 2.5 i 2.6 są to stanowiska A i B). Na każdym ze zdjęć zostają zarejestrowane co najmniej 2 punkty krawędzi budynku (2 i 9, oraz sygnał ustawiony na przeciwległym stanowisku (punkt nr 1). Zamieszczone poniżej rysunki i wzory objaśniają postępowanie dostosowane do zdjęć poziomych (lub prawie poziomych); w przypadku zdjęć nachylonych trzeba będzie przekształcić współrzędne tłowe zdjęcia nachylonego we współrzędne zdjęcia poziomego (lub prawie poziomego), aby następnie wykorzystać wzory 2.10, 2.11, 2.12 – określające wartości poprawek rektyfikacyjnych.



Rys. 2.5. Zdjęcia testowe do wyznaczenia poprawek rektyfikacyjnych wykonywane z dwóch przeciwległych stanowisk

Pomiędzy pomierzonymi współrzędnymi tłowymi zdjęcia prawie poziomego (x' - na stanowisku A, x'' - na stanowisku B) występują następujące zależności:

$$\Delta x'_{2-9} = x'_9 - x'_2 + \Delta z'_{2-9} \cdot d\kappa$$

$$\Delta x''_{2-9} = x''_9 - x''_2 + \Delta z''_{2-9} \cdot d\kappa$$

Δx określa różnicę współrzędnych tłowych zdjęcia przy ściśle poziomej osi kamery, zaś $d\kappa$ oznacza niewielką poprawkę uwzględniającą skreślenie kamery. Ponieważ na obu zdjęciach (przeciwległych) mierzy się te same punkty (2 i 9), a zdjęcia są wykonywane z tej samej odległości od krawędzi budynku, więc $\Delta x' = -\Delta x''$; poprawkę skreślenia kamery można zatem obliczyć ze wzoru:

$$d\kappa = \frac{x''_2 - x''_9 - x'_9 + x'_2}{\Delta z'_{2-9} + \Delta z''_{2-9}} \quad /2.10/$$

Współrzędne tłowe sygnału l spełniają równania:

$$x'_1 + dx_\varphi = 0$$

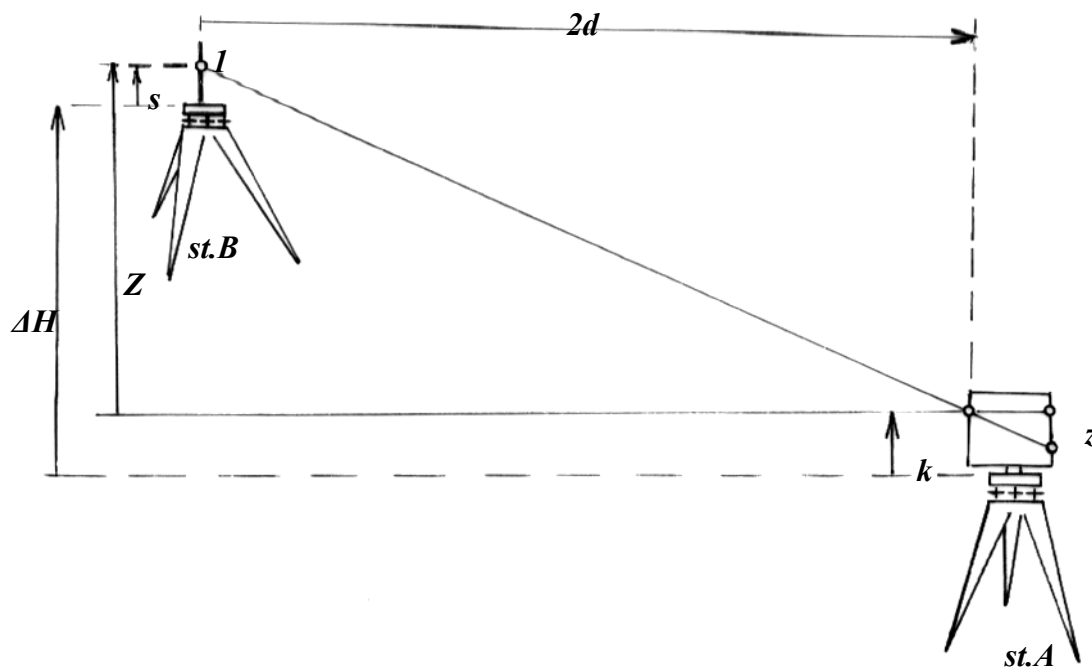
$$x''_1 + dx_\varphi = 0$$

$$dx_\varphi = d\varphi \cdot c_k$$

Wynika stąd, że poprawka zwrotu kamery wynosi

$$d\varphi = \frac{x'_1 + x''_1}{2c_k} \quad [2.11]$$

gdzie: c_k – stała kamery (znana w pikselach). Po wprowadzeniu korekt, zarówno x'_1 , jak i x''_1 powinny być równe 0.



Rys. 2.6. Elementy określające zależności między rzędnymi tłowymi i terenowymi.

Zależności między rzędnymi tłowymi wynikają z rysunku 2.6.

Dla zdjęcia wykonanego na stanowisku A można zapisać:

$$Z_A = \frac{2d}{c_k} z''_1 = \Delta H_{A-B} + s - k$$

Ze zdjęcia wykonanego na stanowisku B wynika:

$$Z_B = \frac{2d}{c_k} z'_1 = \Delta H_{B-A} + s - k$$

Ponieważ $\Delta H_{A-B} = -\Delta H_{B-A}$, więc dodając stronami:

$$\frac{2d}{c_k} (z'_1 + z''_1) = 2s - 2k$$

Ustawiając sygnał (p. 1) na tej samej wysokości nad spodarką (s), co środek rzutów kamery (k), w powyższym wzorze: $2s-2k=0$; ponieważ kamera nie jest zrektifikowana, więc trzeba uwzględnić poprawkę na nachylenie osi kamery $d\omega$:

$$\frac{2d}{c_k}(z'_1+c_k \cdot d\omega + z''_1+c_k \cdot d\omega)=0$$

Poprawkę do nominalnego nachylenia kamery określa zatem wzór:

$$d\omega = \frac{z'_1+z''_1}{-2c_k} \quad /2.12/$$

Teraz należy obliczyć wartości: $\varphi = \varphi_o+d\varphi$, $\omega = \omega_o+d\omega$, $\kappa = \kappa_o+d\kappa$ dodając poprawki rektyfikacyjne do przybliżonych elementów kalibracyjnych¹, aby następnie dokonać transformacji pomierzonych współrzędnych x' , z' (lub x'' , z'') przez obrót według wzoru:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa - \sin \varphi \sin \omega \sin \kappa & -\sin \varphi \cos \omega & \cos \varphi \sin \kappa + \sin \varphi \sin \omega \cos \kappa \\ \sin \varphi \cos \kappa + \cos \varphi \sin \omega \sin \kappa & \cos \varphi \cos \omega & \sin \varphi \sin \kappa - \cos \varphi \sin \omega \cos \kappa \\ -\cos \omega \sin \kappa & \sin \omega & \cos \omega \cos \kappa \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x' \\ c_k \\ z' \end{bmatrix} \quad /2.13/$$

Jest tu obojętne w jakich jednostkach wprowadzamy trzy przestrzenne współrzędne tłowe – w milimetrach, calach czy w pikselach; ważne jest tylko, aby w takich samych jednostkach wprowadzić elementy orientacji wewnętrznej.

Jak już powiedziano, chcąc wyznaczyć poprawki rektyfikacyjne w przypadku zdjęć nachylonych, przestrzenne współrzędne tłowe (x' , c_k , z') trzeba najpierw przetransformować do układu zdjęć poziomych, uwzględniając (we wzorze 2.13) nominalne wartości ω_o , φ_o i κ_o . Następnym krokiem jest więc wyliczenie terenowych „współrzędnych ekwiwalentnych”² w układzie mającym początek w środku rzutów, poziomą oś Y_e skierowaną na punkt 1 (rys. 2.5)), oraz odpowiednio poziomą i pionową - osie X_e i Z_e według wzorów:

$$\begin{aligned} X_e &= \frac{Y_e}{y} x \\ Z_e &= \frac{Y_e}{y} z \end{aligned} \quad /2.14/$$

Najwygodniej jest przyjmować dla każdego zdjęcia wartość Y_e równą odległości do mierzonego obiektu; tutaj – do krawędzi budynku (d). Po tej zamianie, wzory /3/, /4/, 5/ przyjmą postać:

$$d\kappa = \frac{X''_{e2}-X''_{e9}+X'_{e2}-X'_{e9}}{\Delta Z'_{2-9}+\Delta Z''_{2-9}} \quad /2.15/$$

$$d\varphi = \frac{X'_{e1}+X''_{e1}}{2d} \quad /2.16/$$

$$d\omega = \frac{Z'_{e1}+Z''_{e1}}{-2d} \quad /2.17/$$

¹ Jeśli oś kamery jest nominalnie pozioma, to $\omega_o = 0$

² O współrzędnych ekwiwalentnych będzie mowa w rozdziale 4.1 i 5.2.3.

2.4. Adaptacja niemetrycznej kamery cyfrowej do precyzyjnych pomiarów inżynierskich



Nasadka zamocowana na teodolicie

Kamera cyfrowa zamocowana na teodolicie

Rys. 2.18. Prototypowe oprzyrządowanie niemetrycznej kamery cyfrowej Kodak DCS 760 dostosowane do zdjęć nachylonych ($\omega = 16^\circ$)

Aby móc oczekiwać od kamery niemetrycznej spełnienia warunków fototeodolitu, należy ją odpowiednio oprzyrządować. Na „zestaw fotogrametryczny” (rys. 2.18) – muszą się zatem składać: kamera cyfrowa, teodolit i urządzenie mocujące. Jak widać na zdjęciach, urządzenie mocujące jest wyposażone w dwie krzyżowe libele rurkowe (o przewodzie co najmniej 30'') - odpowiedzialne za powtarzalność kątów κ i ω ; powtarzalność kąta zwrotu (φ) gwarantuje teodolit. Aby ten zestaw umożliwiał wykonywanie zdjęć o znanej dokładnie orientacji przestrzennej, konieczne jest określenie poprawek rekyfikacyjnych ($d\omega$, $d\kappa$, $d\varphi$) dodawanych do przybliżonych elementów orientacji kątowej:

$$\omega = \omega_o + d\omega$$

$$\kappa = \kappa_o + d\kappa$$

$$\varphi = \varphi_o + d\varphi$$

Poprawki te – wyznaczone np. metodą opisaną w poprzednim rozdziale - powinny być niezmiennie aż do momentu odkręcenia kamery od zestawu mocującego. Współrzędne tłowe winny być transformowane przez obrót ewdług zależności 2.13.

Opisane postępowanie umożliwia wykonywanie dokładnych fotogrametrycznych pomiarów obiektów inżynierskich w oparciu o nominalną orientację kamery (bez punktów kontrolnych); w rozdziale 5.2.3 opisano pomiar wychyleń od pionu oparty o niemetryczne zdjęcia nachylone.

2.5. Sposoby pomiaru zdjęć w fotogrametrii inżynierskiej

Metody fotogrametrii inżynierskiej - z założenia nietopograficzne - najczęściej mają na celu określenie współrzędnych punktów (w celu wyznaczenia odchylek projektowych), lub przemieszczeń. Na fotogramach mierzone są zatem współrzędne tłowe; rzadziej ich różnice. Czasem system pomiarowo-obliczeniowy dokonuje „*on line*” przekształcenia współrzędnych tłowych w wielkości wynikowe – jak w przypadku autografu, czy fotogrametrycznych stacji cyfrowych (oznaczanych tutaj jako FSC).

Do pomiaru współrzędnych tłowych na fotogramach najwłaściwsze są cyfrowe stacje fotogrametryczne lub stereokomparatory precyzyjne, pozwalające na osiąganie dokładności rzędu 1 μm . Oprzyrządowanie i oprogramowanie autografów analitycznych czyni z nich również doskonałe narzędzie pomiarowe. Obrazy cyfrowe uzyskane w wyniku skanowania fotogramu na wysokorozdzielczym skanerze stacjonarnym - o czym będzie mowa w następnym rozdziale - pozwalają na uzyskanie podobnej dokładności pomiaru - dzięki fotogrametrycznym stacjom cyfrowym (roboczym).

Fotogrametria cyfrowa – o czym będzie mowa w następnym rozdziale - umożliwia automatyzację określania współrzędnych tłowych. Odpowiednie oprogramowanie - dzięki podpixselowej dokładności automatycznego pomiaru znacznej liczby punktów – pozwala na osiągnięcie wysokiej dokładności. Warto jednak pamiętać, że rozdzielczość kamer cyfrowych (a nawet skanerów stacjonarnych) jest niższa od rozdzielczości zdjęć analogowych.

Niezależnie jednak od tego, czy obiektem pomiaru są fotogramy, czy obrazy cyfrowe, podstawowymi wariantami pomiaru pozostają: pomiar pojedynczego zdjęcia, pomiar stereogramu i pomiar pseudostereogramu (pary czasowej). Powyższe zróżnicowanie jest związane z problemem identyfikacji tego samego punktu na różnych zdjęciach.

2.5.1. Pomiar pojedynczych zdjęć i stereogramów

Pomiar fotogramu na stereokomparatorze rozpoczyna się od jego zestrojenia – skręcając nośnik zdjęcia, doprowadza się wybraną łącznicę znaczków tłowych do równoległości względem odpowiedniej prowadnicy przyrządu; powinna to być ta łącznica, której dotyczył warunek rektyfikacji kamery (wzór 2.5 lub 2.6). Niestaranność zestrojenia nie zaważy na wynikach pomiaru, jeżeli odpowiednie niezgodności skorygujemy na drodze obliczeniowej. Współrzędne i paralaksy znaczków tłowych mierzy się przed rozpoczęciem i po zakończeniu właściwego pomiaru.

Stereokomparator *standardowy* (np. STEKO 1818 Zeissa) zapewnia dokładność pomiaru współrzędnych rzędu 0,01mm, oraz paralaks: 2 – 5 μm . Pomiar na *stereokomparatorze precyzyjnym* ułatwiają silniczki przesuwające fotogramy, współrzędne są automatycznie rejestrowane, obserwację ułatwia zmienność powiększenia, oświetlenia i optycznego skręcenia obrazu; współrzędne i paralaksy są mierzone z dokładnością rzędu 1 μm .

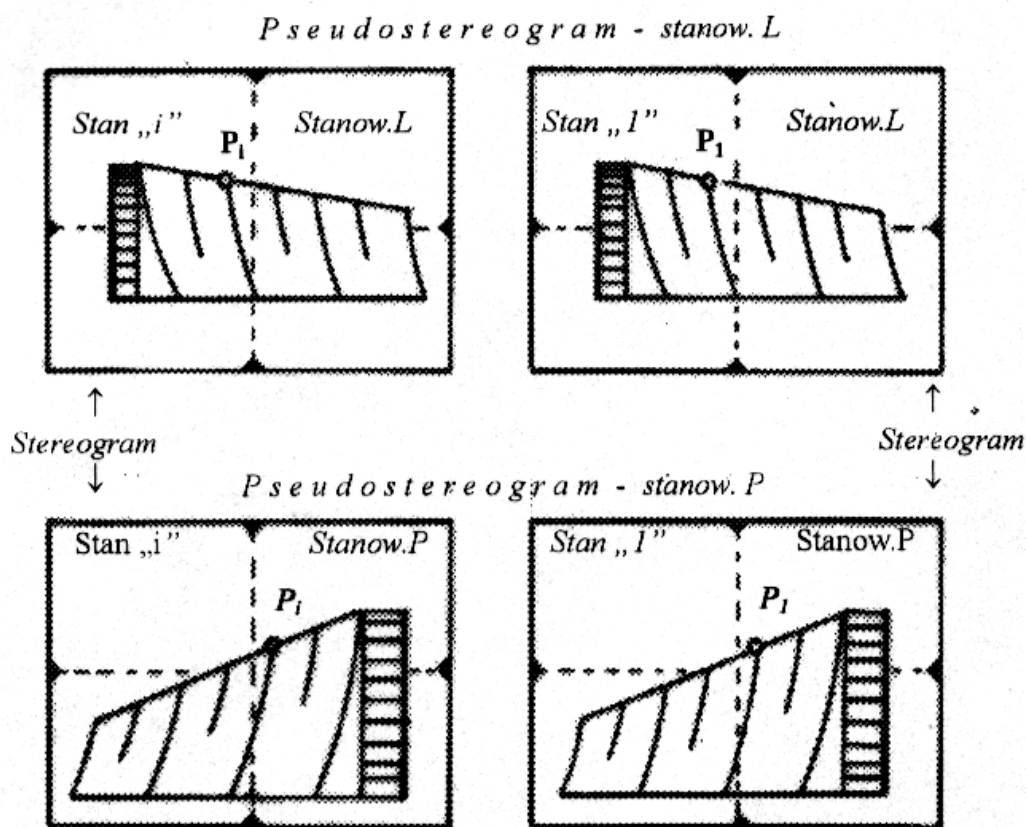
W przypadku pomiaru obrazów cyfrowych w fotogrametrycznej stacji cyfrowej, zadanie zestrojenia (oraz korekcji niektórych zniekształceń odwzorowania) jest realizowane w trakcie orientacji wewnętrznej, na drodze transformacji współrzędnych tłowych.

Pomiar pojedynczych zdjęć stosuje się w przypadku metody jednoobrazowej, oraz w przypadku zdjęć zbieżnych. W tym drugim przypadku – ze względu na wymagania stereoskopii – mierzone punkty powinny być sygnalizowane, lub muszą mieć prostą i jednoznaczną definicję. Jak bowiem wiadomo, warunkiem uzyskania efektu stereoskopowego jest spełnienie warunku: $Y:b > 4$ (co oznacza że kierunki wcinające punkt przecinają się pod kątem mniejszym od 14°); nie jest to

wprawdzie warunek *sine qua non*, ale jego naruszenie pociąga za sobą poważne utrudnienia pomiarowe.

Obserwacja stereoskopowa jest znana studentom jako podstawowe narzędzie, bez którego nie było by możliwe *ciągłe* opracowanie mapy; dokonuje się wtedy - dzięki stereoskopowej obserwacji - bezustannego identyfikowania na obu zdjęciach poszczególnych punktów opracowywanego w danym momencie konturu (sytuacyjnego lub warstwy). Bez stereoskopii, identyfikacja obrazów tego samego szczegółu powierzchni topograficznej na dwu zdjęciach stereogramu nie byłaby w praktyce możliwa (wyjawszy punkty specjalnie zasygnalizowane). W przypadku obiektów inżynierskich o kształcie ułatwiającym obieranie i identyfikowanie punktów kontrolowanych, często można się obejść bez stereoskopii przy fotogrametrycznym wcięciu w przód. Pozwala to na odstąpienie od podyktowanego przez warunki stereoskopowego widzenia, wąskokątnego wcięcia w przód; zbieżne zdjęcia - poprawiając geometrię wcięcia w przód - pozwalają bowiem zwiększyć dokładność określenia położenia wcinanego punktu. Pomocna jest wtedy metoda par czasowych.

2.5.2. Pomiar par czasowych (pseudostereogramów)



Rys. 2.19. Porównanie pomiarów różnic współrzędnych tłowych (paralaks) punktu P na stereogramach (a) i na pseudostereogramach (b): a) paralaksa podłużna: $p = x_i - x_p$, poprzeczna: $q = z_i - z_p$, pseudoparalaksy: $p = x_i - x_1$, $q = z_i - z_1$

Współrzędne punktów określa się fotogrametrycznie na zasadzie wcięcia w przód: dwustanowiskowego (np. stereofotogrametrycznie), lub wielostanowiskowego. Przemieszczenia

punktów kontrolowanych można – jak wiadomo – określać porównując wyniki dwóch pomiarów wykonanych w odstępie czasu (jest to realizacja sposobu „porównywania współrzędnych”).

Alternatywę takiego postępowania stanowi pomiar par czasowych (rys. 2.19) stanowiący pomiarowe narzędzie metody różnicowej. Zestawia się wtedy w przyrządzie fotogrametrycznym (np. w CSF lub w stereokomparatorze) zdjęcia pomiarowe w inny sposób - na obydwu nośnikach układa się zdjęcia wykonane z tego samego stanowiska, ale w różnych momentach. Taka para zdjęć nazywana jest *parą czasową* lub *pseudostereogramem*, zaś mierzone różnice współrzędnych tłowych nie są nazywane paralaksami, ale *paralaksami czasowymi* lub *pseudoparalaksami*. W odróżnieniu od pomiaru par stereogramów - ograniczających liczbę stanowisk do dwóch - pary czasowe można zestawiać ze zdjęć wykonanych z dowolnej liczby stanowisk. Zgodnie z zasadami metody różnicowej, kolejne stany są fotografowane przy zachowaniu tych samych elementów orientacji wewnętrznej i zewnętrznej.

Główną zaletą tej metody jest łatwość dwuocnej (pseudostereoskopowej) identyfikacji tego samego – nawet niesygnalizowanego - szczegółu na zdjęciach zbieżnych różnych stanów. Dzięki temu można nie tylko stosować zdjęcia o dowolnej zbieżności, ale nie musimy - do identyfikacji punktu na obu zdjęciach – wykorzystywać stereoskopowej obserwacji; celujemy więc kolejno na lewym i prawym zdjęciu. Patrząc zaś równocześnie (stereoskopowo) widzimy obraz płaski z wyjątkiem miejsc, gdzie wystąpiły przemieszczenia.

3. Elementy fotogrametrii cyfrowej

3.1. Wstęp

Początki fotogrametrii cyfrowej datuje się na lata osiemdziesiąte ubiegłego stulecia, kiedy to gwałtowny rozwój komputerów umożliwił prace na obrazach cyfrowych.

Fotogrametria analogowa swoje apogeum ma już za sobą, ustępując miejsca fotogrametrii analitycznej i cyfrowej. Metody fotogrametrii analogowej, które nie zawsze spełniały wysokie wymagania dokładnościowe stawiane pomiarom inżynierskim charakteryzowały się głównie brakiem możliwości zastosowania automatyzacji (pomiar punktów na zdjęciach odbywał się w sposób „ręczny”), dużą czasochłonnością, nieporęcznością wykorzystywanych instrumentów, kosztownością wysoko dokładnych opracowań i wysokimi kosztami materiałów światłoczułych oraz ich laboratoryjnej obróbki. Większość tych problemów pozwala rozwiązać fotogrametria cyfrowa, której rozwój podkreśliło pojawienie się kamer cyfrowych.

Niemetryczne kamery cyfrowe mają przewagę nad odpowiednikami analogowymi, dzięki płaskiej (i stałej) matrycy rejestrującej, wobec słabo wypłaszczonej błony filmowej.

Pomiary mogą być wykonywane w trybie *on line* lub nawet w czasie rzeczywistym (RTP - ang. *real time photogrammetry*). „Widzenie maszynowe” (ang. *machine vision*) otworzyło przed fotogrametrią wiele nowych możliwości w tym automatyczne nadzorowanie i sterowanie procesami przemysłowymi, pomiary realizacyjne, badania w medycynie, transporcie i inne. Fotogrametria znalazła zastosowanie w najbardziej zaawansowanych dziedzinach współczesnej techniki: w przemyśle kosmicznym, lotniczym, okrętowym, nuklearnym, motoryzacyjnym. Sukces dokładnościowy zawdzięcza fotogrametria cyfrowa połączeniu techniki automatyzacji pomiaru znacznej liczby punktów z samokalibracyjnym wyrównaniem sieci wiązek.

3.2. Cyfrowe rejestracje obrazów

W ostatnich latach upowszechniła się w fotografii (i w fotogrametrii) technika cyfrowego zapisu obrazu, opracowana pierwotnie dla potrzeb teledetekcji satelitarnej. Analogowe obrazy zbudowane z halogenków srebra są zastępowane przez matryce światłoczułych elementów - detektorów. Obraz optyczny tworzony przez wiązkę promieni w płaszczyźnie obrazowej, jest zapisywany liczbowo – intensywność światła oceniają miliony detektorów. Każdy z nich dostarcza informacji o oświetleniu elementarnego pola obrazu – piksela; jasność każdego piksela jest kodowana na ustalonej liczbie bitów. Obrazy cyfrowe pozyskuje się na innych zasadach niż tradycyjne zdjęcia, które od czasu pojawienia się tych pierwszych (i w celu lepszej rozróżnialności) nazwane są analogowymi lub konwencjonalnymi.

Generalnie możemy mówić o dwóch sposobach pozyskiwania obrazów cyfrowych:

- sposób bezpośredni – poprzez zapis przestrzeni przedmiotowej za pomocą urządzeń pozwalających rejestrować obraz w formie cyfrowej za pomocą odpowiednich sensorów (np. kamery z matrycami CCD);
- sposób pośredni – poprzez doprowadzenie do postaci cyfrowej istniejących materiałów analogowych np. poprzez skanowanie zdjęć, szklanych klisz wykonanych kamerami naziemnymi lub papierowych odbitek stykowych.

Komentarz [A1]: dz

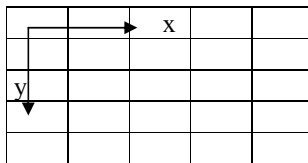
Sposób bezpośredni jest podobny do procesu wykonywania zdjęć w sposób tradycyjny, jednak istota rzeczy polega na umieszczeniu w miejscu ramki tłowej - zamiast tradycyjnego filmu czy kliszy szklanej - nowoczesnej matrycy CCD pozwalającej na bezpośrednią rejestrację obrazu. Pojedyncza -

elementarna część obrazu cyfrowego nazywana jest pikselem (od angielskiego *picture element*).

Obraz cyfrowy ma strukturę macierzową; składa się z pikseli, uporządkowanych w wiersze (linie) i kolumny. Zwykle początek układu współrzędnych przyjmuje się w lewym górnym rogu obrazu, gdzie x oznacza położenie piksela w danej linii obrazu, y natomiast oznacza nr linii (rys. 3.1).

Oprócz swojego położenia geometrycznego (nr wiersza i kolumny w macierzy), każdy piksel ma przypisaną wartość odpowiedzi spektralnej, która jest liczbą w pewnym zakresie (najczęściej od 0 do 255). Zakres ten zależy od wielkości pamięci jaką zarezerwujemy dla danego piksela. Standardowy obraz monochromatyczny rezerwuje pamięć wielkości 8 bitów (czyli 1 Bajt pamięci) na każdy piksel. Wówczas dany piksel może „odzwierciedlać” rzeczywistość jako liczbę z zakresu 0-255. Wiele systemów ma jednak możliwość rejestracji obrazu w szerszym zakresie np. 2 lub 4 Bajtów. Szerszy zakres niż 8 bitów wykorzystuje się głównie w teledetekcji.

Tak jest w przypadku obrazów monochromatycznych; gdy jednak mamy do czynienia z obrazem kolorowym pojedynczy piksel ma przypisane zwykle trzy wartości składowych koloru (RGB): R – czerwony, G – zielony i B – niebieski. Każda z nich może przyjmować wartości w zakresie 0-255 lub szerszym, przez co obraz kolorowy jest najczęściej trzy razy większy od obrazu monochromatycznego.



Rys. 3.1. Najczęściej definiowany układ współrzędnych na obrazie cyfrowym (ale w VSD oś y jest skierowana w górę !)

3.2.1. Kamery cyfrowe

Do bezpośrednich, cyfrowych rejestracji obrazów służą kamery cyfrowe. W odróżnieniu od „okrężnej” drogi skanowania obrazów analogowych, bezpośrednia rejestracja umożliwia pomiar w czasie rzeczywistym (opracowanie *on line*), zaś w przypadku automatyzacji pomiaru obrazów cyfrowych możemy mówić o – nieodzownym w robotyce – sztucznym widzeniu.

Kamery cyfrowe są jeszcze czasem budowane na bazie analogowych aparatów fotograficznych (np. lustrzanek jednoobiektywowych), ale większość z nich to już są konstrukcje całkiem nowe, najczęściej typu „compact”. Nowoczesna, wysokorozdzielcza kamera cyfrowa ma wbudowany system przetwarzający obrazy analogowe w cyfrowe (*A/D conversion*) i ma wbudowany twardy dysk o pojemności kilku GB, pozwalający na zapisanie ponad stu obrazów.

Głównym ograniczeniem opóźniającym wyparcie rejestracji analogowych – z zastosowań pomiarowych – jest niedostateczna rozdzielczość geometryczna obrazów uzyskiwanych przy pomocy kamer cyfrowych, co rzutuje na dokładność pomiaru. Pomimo swoistego wyścigu technologicznego, nie udało się jeszcze skonstruować kamery cyfrowej, która rejestrowałaby obraz z rozdzielczością typową dla analogowego fotogramu. Matrycę standardowej kamery CCD charakteryzują 2-6 megapiksele, kamery profesjonalne - ponad 6 megapiksele, zaś niektóre specjalne kamery klasy „*High Resolution*” - 40 megapikseli, przy wymiarach piksela 4 - 14 μm .

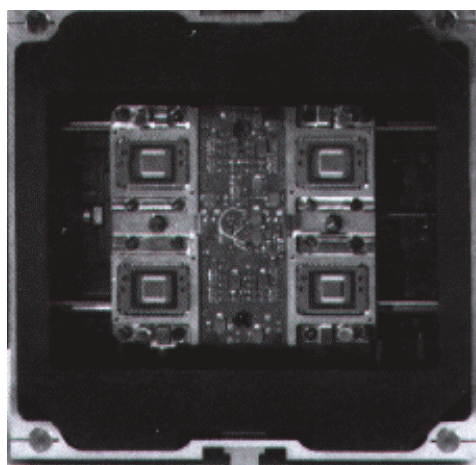
Przodujące firmy uczestniczące w tym „wyścigu”, stosują – poza powierzchniowymi matrycami detektorów CCD - różne rozwiązania:

- linijka sensorów, lub kilka linijek sensorów,
- kilka matryc sensorów CCD wypełniających kadr ,

- obok matryc CCD (elementy półprzewodnikowe ze sprzężeniem ładunkowym), stosuje się CMOS (*complementary metal oxide semiconductor*) – technologię tańszą produkcyjnie i bardziej wydajną eksploatacyjnie.

Z pośród niemetrycznych kamer cyfrowych o najwyższej geometrycznej rozdzielczości obrazu, na uwagę zasługuje kamera analogowa Rollei 6008 z przystawką skanującą Gamma S12. Obrazy o formacie 56x56 mm są skanowane z rozdzielczością 16 μm ; linijka sensorów liczy 12.000 elementów CCD. Wadą tego rozwiązania jest rozciągnięcie rejestracji w czasie, zaś ewentualne nieprostoliniowości prowadnic linijki sensorów mogą stanowić źródło dodatkowych błędów.

Jak wskazują publikacje fotogrametryczne, chętnie wykorzystywane do celów pomiarowych są kamery cyfrowe Hasselblad, Rollei, oraz Kodak: DCS 660 a ostatnio – DCS 760. Podstawowe parametry tych kamer są podobne: matryca CCD składa się z ponad 6.000.000 elementów; format obrazu 18x28mm, co umożliwia osiąganie prawie normalnokątnego zasięgu kamery, przy standardowym obiektywie 50 mm. Nowszy z tych modeli – kamera DCS 760 została zbudowana na bazie doskonałej lustrzanki japońskiej Nikon F5. Matryca obrazowa CCD składa się z 6.1502.000 elementów (2016x3052) o wymiarze 9 μm . Aparat posiada czułość w zakresie 80 – 400 ISO i umożliwia wykonywanie zdjęć z częstotliwością 1,5 klatki/sek. Wbudowany miniaturowy twardy dysk MicroDrive o pojemności 1 GB pozwala na zapisanie ponad 100 obrazów w formacie TIFF lub JPG.



Rys. 3.2. Matryce CCD w kamerze Zeiss - UMK HighSCAN (15.4 K x 11 K pikseli)

Wśród cyfrowych kamer przydatnych w fotogrametrii bliskiego zasięgu można wyróżnić:

- aparaty fotograficzne *still video* (wolnopowtarzalne) z powierzchniową matrycą CCD,
- cyfrowe kamery skanujące,
- profesjonalne cyfrowe kamery pomiarowe,
- szybkie kamery cyfrowe.

Wolnopowtarzalne aparaty fotograficzne traktowane są jako kamery niemetryczne. Na szczególną uwagę zasługuje kilka z nich.

Kamera Kodak DCS Pro jest wyposażona w matrycę CCD o efektywnej liczbie pikseli 13,7 mln (4536x3024) przy formacie obrazu 24x36mm. Analogiczne parametry innych kamer to:

- Mamiya ZD: 21,5 mln , 4008x5344, 36x48 mm,
- Hasselblad H2D: 39 mln , 37x49 mm.

Przystawki cyfrowe montowane do aparatów analogowych (Hasselblad, Contax, Mamiya, Kodak, Rollei) cechują jeszcze lepsze parametry: 35 – 49 mln pikseli, przy formacie 37 x 49 mm a nawet 56 x 56 mm.

Cyfrowe kamery skanujące pozwalają osiągnąć wysoką rozdzielczość metodą skanowania kadru linijką detektorów, lub powierzchniową matrycą CCD; rejestracja trwa powyżej 300 sekund.

Osiąga się w tych przypadkach:

- Rollei RSC: 20 mln pikseli,
- Pentacon Scan 3000: 29 mln ,
- Pentacon Scan 5000 : 49 mln.

Produkowane są również – dość drogie – cyfrowe kamery pomiarowe, gwarantujące wysoką powtarzalność rejestracji, oraz stałość elementów orientacji wewnętrznej. Niektóre z nich mają wbudowany procesor przetwarzania obrazu, umożliwiający automatyczny pomiar odpowiednio sygnalizowanych punktów. Pomiarowa kamera Zeiss UMK High Scan (oparta na korpusie analogowej kamery UMK) skanuje kadr o wymiarach 120x166 mm, przy pomocy 4 sensorów CCD, rejestrując obraz cyfrowy o formacie 15.414 x 11.040 pikseli.

Szybkie kamery cyfrowe umożliwiają rejestrację z częstotliwością 10 megaherców (ale ze stosunkowo niską rozdzielczością geometryczną). Są one stosowane do śledzenia zjawisk dynamicznych w przemyśle, komunikacji, medycynie i badaniach naukowych

Analizując warunki, których spełnienie będzie konieczne w konkretnym przypadku pomiarowym, należy uwzględnić szereg czynników. Najbardziej miarodajnym wskaźnikiem jakości metody pomiarowej jest dokładność względna, określająca stosunek błędu wyznaczenia położenia punktu do odległości fotografowania. I tak za osiągalną aktualnie dokładność cyfrowej fotogrametrii bliskiego zasięgu uważa się 1 : 50.000. Odpowiada to błędowi określenia kierunku 4''. Aby np. przy ogniskowej 50 mm osiągnąć tę dokładność, konieczne jest ograniczenie błędu pomiaru obrazu cyfrowego do 2,5 – 1 μ m. Przy wymiarze piksela rzędu 6 – 9 μ m konieczne jest zatem uzyskanie dokładności podpikselowej. Normalnokątny zasięg kamery będzie osiągnięty przy formacie matrycy 24 x 36 mm.

Analizując przykładowo możliwości dokładnościowe które stwarza kamera Hasselblad (39mln, 37x49mm) można wyliczyć : pixel 7 μ m, co przy obiektywie f=75mm (normalnokątny) uzyskamy rozdzielczość kątową 19''. Schodząc z pomiarem podpikselowym do 1/10 piksela uzyskamy błąd kierunku 1,9''; przy „ręcznym pomiarze (1/5 piksela) – 3,8''. Jest to już porównywalne z wynikami analogowej fotogrametrii inżynierskiej (obiektywu) – nie jest możliwa. Dlatego matryce CCD o formatach standardowych są preferowane. Dysponując niemetryczną (ale wysokorozdzielczą) kamerą cyfrową, osiąga się obecnie dokładność względną 1: 150.000.

Istotnym wymogiem - z punktu widzenia fotogrametrii - stawianym kamerom cyfrowym, jest wysoka stabilność elementów orientacji wewnętrznej i powtarzalność odwzorowań. W niektórych kamerach analogowych – mając powyższe na uwadze - w płaszczyźnie ramki tłowej umieszcza się siatkę krzyży (*reseau*); co pozwala zwiększyć poprawność rekonstrukcji wiązki. Precyzyjna kalibracja kamery cyfrowej również ma sens jedynie w przypadku wysokiej powtarzalności odwzorowań – nie każda zatem wysokorozdzielcza kamera cyfrowa może stwarzać warunki do osiągania wysokich dokładności pomiaru. W trakcie kalibracji jak wiadomo określa się stałą kamery, współrzędne punktu głównego, oraz współczynniki wielomianu dystorsji (który *de facto* uwzględnia nie tylko wpływ zniekształceń optycznych). Kalibrację kamery przeprowadza się na polu testowym (płaskim lub

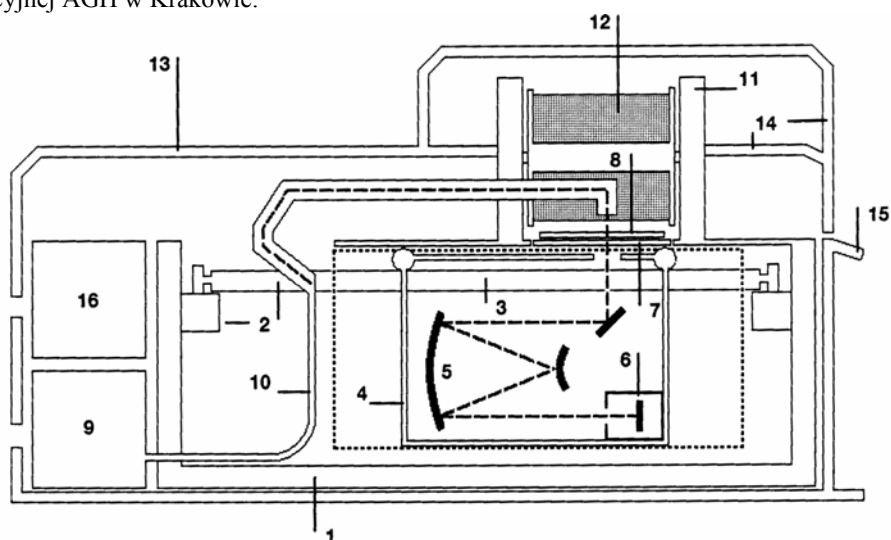
przestrzennym). Wielostanowiskową sieć kalibracyjną najkorzystniej jest liczyć i wyrównywać przy pomocy programu samokalibracji.

Technologiczne trudności powodują, że kamery cyfrowe o najwyższej rozdzielczości są dość drogie; drogie są także nieco mniej ambitne rozwiązania – kamery profesjonalne z matrycami rzędu 6 milionów pikseli. Ostatnio – w wyniku wspomnianego wyścigu producentów, oraz zwiększającego się popytu – ceny sukcesywnie spadają, co pozwala uznać problem osiągalności i opłacalności stosowania w Polsce wysokorozdzielczych kamer za perspektywę najbliższej dekady.

3.2.2. Skanery fotogrametryczne

Skanery fotogrametryczne w odróżnieniu od standardowych charakteryzują się bardzo wysoką dokładnością geometryczną rzędu 1 – 3 mikrometrów. Nie jest to możliwe do osiągnięcia w przypadku skanerów standardowych, w związku z tym ich stosowanie jest bardzo ograniczone. Czasem jednak są wykorzystywane do opracowań, gdzie wymogi dokładnościowe nie są zbyt wysokie, ale wówczas konieczna jest znajomość rozkładu błędów (dystorsja) skanera, aby można było wprowadzić odpowiednie korekty zniekształconego obrazu.

Budowa i działanie skanera fotogrametrycznego zostanie przedstawiona na przykładzie skanera PHOTOSCAN –TD, znajdującego się na wyposażeniu Zakładu Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH w Krakowie.



- | | |
|--------------------------------------|------------------------------------|
| 1. Obudowa | 9. Lampa |
| 2. Prowadnica główna | 10. System optyczny |
| 3. Koder liniowy | 11. Przewijarka (dostępna w opcji) |
| 4. Prowadnica druga | 12. Rolka filmu (dostępna w opcji) |
| 5. Zwierciadło | 13. Pokrywa instrumentu |
| 6. Matryca CCD | 14. Pokrywa instrumentu |
| 7. Nośnik (płyta szklana) na zdjęcie | 15. Panel sterowania |
| 8. Płyta szklana dociskowa | 16. Moduł elektroniczny |

Rys.3.3. Schemat budowy skanera Photoscan TD

Skaner Photoscan TD posiada prowadnicę główną (2 - rys. 3.3), z serwo-motorami działającymi w kierunku x i y. Lampa tungsten - halogen (9) dostarcza stabilnego źródła światła, które systemem optycznym (10) przechodzi przez soczewkę i emulsję zdjęcia. Światło pada na liniową matrycę CCD (6), z której zbierane są dane i przesyła dalej do komputera. System optyczny (10) z soczewką i matrycą CCD tworzą drugą prowadnicę, która skanuje zdjęcie podczas precyzyjnego ruchu. Moduł CCD składa się z trzykolorowej liniowej matrycy CCD i rejestruje trzy kanały w pojedynczym cyklu skanowania 5632 piksele w liniowej matrycy CCD dostarczając pas danych o szerokości 39.424 mm, oznacza to, że skanowanie zdjęcia w formacie 230 mm może się odbyć w 6 pasach.

Skaner ten jest przeznaczony do pracy na foliach poliestrowych, jednak posiada również możliwość skanowania szklanych klisz.. Może to zrobić przez usunięcie górnej szklanej płyty dociskowej (nr 8 – Rys. 3.3). Można również skanować tradycyjne filmy (rozmiar klatki 24 x 36 mm) wykorzystywane w fotogrametrii do wykonywania zdjęć niometrycznych.

3.2.2.1. Przygotowanie zdjęcia do skanowania

Przed założeniem zdjęcia na nośnik powinno ono być dokładnie oczyszczone przy pomocy materiałów antystatycznych (z ewentualnego kurzu) oraz przy pomocy specjalistycznych płynów z innych zanieczyszczeń bądź przypadkowych odcisków palców, mogących występować na zdjęciach. Należy uwzględnić, że przy maksymalnej aperturze skanowania (7 mikrometrów) płatki kurzu mają kilkanaście na kilkanaście pikseli, stąd konieczna jest dbałość szczególnie o czystość stanowiska pracy.

W zależności od tego, czy obraz jest odwrócony czy nie, zdjęcie umieszcza się na nośniku w odmienny sposób. W przypadku zdjęcia, którego numer po ułożeniu na skanerze jest odwrócony należy ustawić opcję prawo-czytelną (*ang. right-reading*), natomiast w innym przypadku lewo-czytelną (*ang. wrong-reading*).

Tak przygotowane zdjęcie umieszcza się na nośniku skanera emulsją do układu optycznego (warunek konieczny) i dociska płytą (8).

3.2.2.2. Proces skanowania

Pomieszczenie gdzie umieszczony jest skaner powinno spełniać pewne warunki.

Powinno posiadać trwałe i stabilne podłoże (ponieważ skaner wymaga zachowania bardzo niskiego poziomu drgań), jak również powinno być klimatyzowane aby zapewnić stałą temperaturę (15 - 25 °) oraz wilgotność (30 - 80 %).

Bardzo ważną rzeczą jest również używanie antystatycznych materiałów w celu eliminowania nagromadzonych ładunków elektrycznych. Duża ilość ładunków powoduje występowanie kurzu, który osiadając na zdjęciach powoduje zanieczyszczenia obrazu, o czym wspomniano wcześniej.

Po włączeniu skanera wraz z nim uruchamiany jest komputer kontrolny połączony za pomocą magistrali SCAI do komputera PC. Następnie po sygnalizacji skanera i przejściu niezbędnych testów uruchamiany jest komputer PC z zainstalowanym oprogramowaniem do obsługi skanera.

Po ustawieniu odpowiednich parametrów uruchamia się program skanujący.

W czasie skanowania prowadnica główna (2) oraz druga (4) poruszają się w kierunku "przód - tył" skanera. Po zeskanowaniu pierwszego pasa prowadnica ustawia się automatycznie na sąsiednim pasie. Dla maksymalnego formatu 275 mm może wystąpić 7 pasów skanowania. W trakcie skanowania dane transmitowane przez magistralę SCAI umieszczane są w komputerze PC.

Większość opracowań cyfrowych (aerofotogrametrycznych i terrofotogrametrycznych) – opiera się obecnie na obrazach cyfrowych pozyskanych w drodze skanowania metrycznych zdjęć analogowych (wykonanych pomiarowymi kamerami fotogrametrycznymi). Tą pośrednią drogę postępowania (w której wykorzystujemy stacjonarny skaner laboratoryjny) nazywa się czasem analogowo-cyfrową.

Skanery stały się obecnie dość powszechnie stosowanym urządzeniem do zamiany zdjęcia z postaci analogowej (fotograficznej) na obraz w postaci cyfrowej, począwszy od podręcznych skanerów stosowanych do skanowania tekstów, rysunków czy zdjęć małoformatowych, do wielkoformatowych skanerów stosowanych w poligrafii. W geodezji do skanowania map stosowane są również skanery wielkoformatowe, ale o podwyższonej dokładności geometrycznej (0.05 - 0.10 mm), odpowiadającej dokładności mapy, aby w procesie skanowania nie nastąpiło obniżenie jej dokładności geometrycznej. Tego rodzaju skanery nie nadają się jednak do stosowania w fotogrametrii, gdzie są bardzo wysokie wymagania dokładnościowe. Dlatego też skonstruowano specjalne skanery fotogrametryczne.

Głównymi cechami skanerów stosowanych w fotogrametrii są:

- wysoka dokładność geometryczna (1-2 μm .),
- wysoka rozdzielczość geometryczna , np. w skanerze PHOTO SCAN (Intergraph-Zeiss) można skanować z rozdzielczością do 3600dpi, a typowe wymiary piksela to: 7, 14, 21, 28, 56 μm .)
- rozdzielczość radiometryczna 8 bitowa dla zdjęć czarno-białych i 24 bitowa dla zdjęć barwnych,
- format, najczęściej 25x25 cm, co umożliwi zeskanowanie typowych zdjęć lotniczych,
- możliwość skanowania materiałów przezroczystych i nieprzezroczystych,
- możliwość skanowania zdjęć w rolce bez konieczności ich rozcinania.

Podczas skanowania zdjęć należy odpowiednio dobrać parametry skanowania. Przede wszystkim należy zdefiniować według jakiej zasady przypisywane będą wartości liczbowe poszczególnym pikselom. Możliwe są trzy definicje wartości piksela: jako funkcja współczynnika przepuszczalności, jako funkcja gęstości optycznej lub jako funkcja współczynnika korygującego gamma. Współczynnik gamma, w zależności od przyjętej wartości, umożliwia lepsze oddanie szczegółów w zaciemionych lub jasnych partiach obrazu. Ponadto należy ustalić minimalną i maksymalną wartość współczynnika przepuszczalności tak, aby poprawnie zarejestrowały się znaczki tłowe (najczęściej jasne krzyże na ciemnym tle) oraz treść obrazu. Dobór odpowiednich parametrów ma duży wpływ na końcową jakość obrazu i w zasadzie powinien być przeprowadzany indywidualnie dla każdego zdjęcia a przynajmniej dla grupy zdjęć (np. szeregu) wykonywanych w podobnych warunkach oświetleniowych.

Cechami charakteryzującymi obrazy cyfrowe są: rozdzielczość geometryczna, radiometryczna i spektralna. Rozdzielczość geometryczna – jak wiadomo - charakteryzuje wielkość najmniejszego elementu obrazu (piksela) i jest najczęściej wyrażana liczbą pikseli przypadającą na jeden cal (dpi - ang. *dot per inch*). Rozdzielczość radiometryczna charakteryzuje liczbę poziomów jasności, w której zapisywany jest obraz cyfrowy. Najczęściej obraz zapisywany jest na 256 poziomach jasności co pozwala na zapisanie wartości piksela na jednym bajcie. Natomiast rozdzielczość spektralna podaje w jakim zakresie spektrum promieniowania elektromagnetycznego rejestrowany jest obraz. Dla zdjęć kolorowych obraz zapisywany jest również na 256 poziomach dla trzech kolorów podstawowych: czerwonego , zielonego i niebieskiego. Obrazy cyfrowe mogą być zapisywane w różny sposób, nie ma niestety jednego standardu zapisu obrazów cyfrowych. Najbardziej rozpowszechniony jest format TIFF, który występuje w kilku wersjach.

3.2.2.3. Archiwizacja i formaty danych cyfrowych

Archiwizacja danych może odbywać się na komputerze PC, jednak najlepiej jest połączyć komputer siecią z innym i kopiować pliki podczas skanowania, aby zaoszczędzić na czasie. Kopiowanie podczas

skanowania nie ma żadnego wpływu na skanowanie, z racji tego, że dane ze skanera przechodzą magistralą SCAI a dane w sieci poprzez kartę i kabel sieciowy niezależny od SCAI.

Archiwizowanie plików z racji ich objętości może odbywać się poprzez nagrywanie na nośniki CD (do 800 MB), DVD (do 17 GB) lub inne urządzenia archiwizujące.

Oprogramowanie zainstalowane na komputerze PC pozwala na automatyczne kompresowanie danych podczas zapisu.

Ze względu na dużą objętość obrazów cyfrowych, dla ułatwienia ich przechowywania, opracowano różne metody kompresji obrazów. Metody kompresji można podzielić na bezstratne (po dekompresji jakość obrazu nie ulega degradacji) i stratne np. JPEG (bardziej wydajne, lecz powodujące obniżenie jakości obrazu po jego dekompresji).

Dane cyfrowe mogą być magazynowane w pamięci komputera w różnej postaci.

Rejestrowane obrazy czy to poprzez skanowanie czy zapis bezpośredni zapisywane są na dysku w postaci plików graficznych.

Najczęściej występująca struktura takiego pliku to:

- nagłówek pliku,
- obraz,
- koniec pliku.

W nagłówku pliku zapisywane są informacje takie jak: rodzaj pliku graficznego, ilość wierszy lub kolumn obrazu itp. Dopiero po tych informacjach następuje zapis rzeczywistego obrazu. Zapisywana jest najczęściej wartość jasności danego piksela jako liczba od 0 do 255 w przypadku obrazu monochromatycznego (odcienie szarości) lub trzy takie liczby w przypadku obrazu kolorowego.

Na zakończenie zapisywane są informacje o końcu pliku.

Jednym z prostszych formatów graficznych jest BMP (*ang. Bit Map*).

Plik mapy bitowej nie jest prostą mapą bitów, jak sugeruje nazwa. Jest to plik zawierający strukturę, na którą składają się informacje o typie, rozmiarze, kolorze, oraz o elementach obrazu, czyli pikselach. Pliki map bitowych mogą magazynować obrazy o jakości fotograficznej, jak też i proste wizerunki np. ikon windowsowych.

W ostatnich latach spopularyzował się format graficzny TIFF. Jest to jedyny format, który jest czytany przez wszystkie cztery stacje fotogrametryczne opisane w tym rozdziale.

Format TIFF może być kompresowany metodą bezstratną (kompresja LZW). Jednak zysk z powodu zastosowania tego rodzaju kompresji (zależny oczywiście od struktury obrazu) jest znikomy. Spowodowało to konieczność stworzenia formatów, pozwalających na generowanie obrazów przy większym współczynniku kompresji. Wprowadzono formaty graficzne kompresowane stratnie.

Zatem ze względu na rodzaj kompresji pliku graficzne możemy podzielić na:

- pliki kompresowane metodą bezstratną (np. kompresja LZW);
- pliki kompresowane metodą stratną (np. JPEG, ECW).

Od kilku lat, w środowisku fotogrametrycznym dominuje format JPEG. Kompresja stratna powoduje, że obraz po kompresji nie jest identyczny z obrazem oryginalnym. Występujące pewne różnice w jasnościach pikseli są zależne od „mocy” użytej kompresji. W przypadku JPEG odbywa się to poprzez wybór wielkości współczynnika kompresji Q (w zakresie od 1 do 100).

Obrazy kompresowane metodą JPEG są szeroko stosowane w fotogrametrycznych stacjach cyfrowych np. Image Station.

3.3. Pomiary obrazów cyfrowych

Pomiarowe opracowanie zdjęć i stereogramów cyfrowych przeprowadza się w fotogrametrycznych stacjach cyfrowych, lub w autografach cyfrowych. W trakcie pomiaru określa się pozycję mierzonego piksela, aby następnie określić współrzędne płowe lub terenowe punktu.

Oprogramowanie fotogrametrycznej stacji cyfrowej umożliwia obserwowanie obrazów cyfrowych w dogodnej skali, przemieszczanie się po obrazie, wybór kadru i inne operacje związane z obserwacją obrazów. Kontury obwodzone kursorem, spełniającym funkcję znacznika pomiarowego, mogą być wektoryzowane. Pozycja punktu, określona numerem wiersza (x) i kolumny (y) może być przetworzona do innego układu (X, Y) przy wykorzystaniu wybranej formuły transformacji.

3.3.1. Fotogrametryczne stacje cyfrowe

Fotogrametryczne stacje cyfrowe są to systemy, składające się ze sprzętu (*ang. hardware*) oraz oprogramowania (*ang. software*) pozwalające na wykonywanie prac fotogrametrycznych z wykorzystaniem obrazów cyfrowych.

Zasadniczym elementem jest odpowiednio wyposażony komputer (o maksymalnie dużej liczbie pamięci operacyjnej i wielkości dysku twardego, dobra karta graficzna) plus duży monitor np. 21 cali, pozwalający na współpracę z systemem optycznym, w przypadku stereoskopu lub polaryzujących okularów umożliwiających obserwację stereoskopową.

Najistotniejszym jednak elementem stacji jest oprogramowanie, od którego zależą potencjalne możliwości stacji oraz technologia.

Typowa stacja fotogrametryczna pozwala realizować (a także częściowo zautomatyzować) - następujące procedury technologiczne:

- przeprowadzenie orientacji (wewnętrznej, wzajemnej i bezwzględnej),
- pomiar punktów stereogramu i pojedynczego zdjęcia z wykorzystaniem autokorelacji,
- wektoryzację elementów stanowiących treść opracowania (np. mapy),

- automatyczną lub półautomatyczną aerotriangulację,
- automatyczny pomiar danych do numerycznego modelu terenu (NMT, lub z *ang. DTM*),
- wytwarzanie cyfrowych ortofotomap,
- pozyskiwanie różnych danych do SIT.

Do najbardziej rozpowszechnionych w Polsce fotogrametrycznych stacji cyfrowych (stacji roboczych) należą:

- VSD - „videostereodigitizer” (najprzystępniejszy cenowo), znany studentom AGH z podstawowego kursu fotogrametrii,
- DEPHOS - produkt krakowskiego KPG (na dość drogich komponentach: profesjonalna karta graficzna, okulary ciekłokrystaliczne, manipulator),
- wysokoprofesjonalne, ale drogie stacje cyfrowe firm INTERGRAPH i LEICA.

Wymienione stacje fotogrametryczne zostaną krótko scharakteryzowane.

1. VSD

VSD jest analitycznym autografem cyfrowym powstałym w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie na początku lat dziewięćdziesiątych [*Jachimski, 1995*]. Zawiera wszystkie możliwe

moduły potrzebne do zestrojenia modeli i pracy na nich. Wadą tego systemu jest możliwość pracy tylko w środowisku DOS.

VSD pracuje na formacie graficznym TIFF (indeksowany). Powoduje to pewne ograniczenia, ponieważ zmusza użytkownika do przechowywania dużej ilości danych w przypadku pracy na oryginalnych obrazach zeskanowanych w dużych rozdzielczościach.

Obserwacja stereoskopowa odbywa się tutaj poprzez stereoskop zwierciadlany.

2. DEPHOS

Cyfrowa Stacja Fotogrametryczna DEPHOS jest to polska stacja, dająca użytkownikowi możliwość samodzielnego i niezależnego wykonywania zadań fotogrametrycznych, a dzięki otwartości formatów danych i elastyczności może być z łatwością wkomponowana w istniejące technologie. DEPHOS umożliwia zasilanie danymi systemów mapy numerycznej i GIS a także edycję i aktualizację istniejących materiałów (nawet 2D). Funkcje kolekcji elementów DTM i ortorektyfikacji zdjęć, tworzą technologię opracowania ortofotomapy. Wszystkie możliwości i zalety systemu można także w pełni wykorzystać przy naziemnych opracowaniach fotogrametrycznych.

Szczegółowe informacje można uzyskać na stronie www.dephos.com.

3. Image Station - Z/I IMAGING (dawniej INTERGRAPH)

Amerykański produkt Image Station (rys. 3.4) jest chyba najbardziej popularną stacją fotogrametryczną zarówno w Polsce jak i na świecie. System ten w pełni realizuje zadania fotogrametryczne.

Główną zaletą tego systemu jest automatyzacja. Jest to jeden z niewielu systemów na świecie, tak dobrze zautomatyzowany. Pomiar numerycznego modelu terenu może odbywać w sposób automatyczny dzięki modułowi ImageStation Automatic Elevation (ISAE) – we wcześniejszych wersjach był to MATCH-T. Po zdefiniowaniu wielkości oczka siatki (tzw. GRID) program dzięki automatycznej pracy pokrywa zadany wcześniej obszar punktami stanowiącymi pikietę położone na odpowiedniej wysokości terenowej. Po zakończeniu pracy, użytkownik ma możliwość korekcji ewentualnych błędów. Występujące błędy mogą być spowodowane niskim poziomem korelacji pomiędzy obrazami, wynikającej z trudnej do analizy tekstury obrazu.

W stacjach firmy Z/I Imaging zautomatyzowany jest również proces aerotriangulacji dzięki modułowi ImageStation Automatic Triangulation (ISAT) – znany użytkownikom z wcześniejszej nazwy - MATCH-AT.

Szczegóły można znaleźć na stronie www.ziimaging.com



Rys. 3.4. Zestaw Image Station 2002.

4. DVP

Stacja fotogrametryczna **DVP** (*ang. Digital Video Plotter*) produkcji kanadyjskiej, chociaż kojarzona jest często z LEICĄ jako, że jeszcze kilka lat temu firma LEICA była jej dystrybutorem.

Początki DVP sięgają końca lat osiemdziesiątych, kiedy to w „Laval University” (Quebec, Canada) powstał prototyp programu pracującego jeszcze w systemie operacyjnym DOS.

Aktualnie DVP jest nowoczesną graficzną stacją fotogrametryczną dostarczającą kompletny zestaw narzędzi pozwalający wykonać wszystkie etapy procesu fotogrametrycznego. Oprócz tego DVP posiada moduł do półautomatycznego generowania numerycznego modelu terenu. Z ciekawych możliwości DVP godna odnotowania jest możliwość pracy w jednym w czterech dostępnych systemach obserwacji stereoskopowej:

- poprzez filtr polaryzujący oraz odpowiednio spolaryzowane okulary,
- poprzez okulary polaryzujące,
- tradycyjny stereoskop zwierciadlany,
- okulary anaglifowe.

Szczegóły można znaleźć na stronie www.dvp.ca.

3.3.2. Automatyzacja pomiarów na obrazach cyfrowych¹

Jednym z fundamentalnych procesów w fotogrametrii jest identyfikacja i pomiar punktów homologicznych na dwóch lub więcej obrazach. Zadaniem takiego pomiaru jest wybranie obiektu na jednym obrazie i odszukanie odpowiednika na drugim. W fotogrametrii analogowej i analitycznej operator dokonuje pomiaru manualnego. W fotogrametrii cyfrowej dąży się do rozwiązania problemu w sposób automatyczny. Proces ten nazywa się z *ang. image matching* (czasami zwany *automatic stereo matching* lub po prostu *correlation*). W przypadku *matchingu* kilku obrazów mówi się o

¹ Opracowano na podstawie „*Digital Photogrammetry - Volume 1*” T. Schenk, 1999.

multiple image matching i wykorzystuje najczęściej w aerotriangulacji czy *matchingu* obrazów sekwencyjnych (obrazy pozyskane kamerami wideo).

Początki *image matchingu* datuje się na lata pięćdziesiąte, gdzie opracowano korelatory poziomów szarości dwóch obrazów. Firma Wild Heerbrugg na kongresie ISPRS w 1968 roku zaprezentowała pierwszy korelator. Lata siedemdziesiąte i osiemdziesiąte to już pierwsze zastosowania cyfrowych technik korelacji obrazów. Dokonano pierwszych prób zastosowania *matchingu* do numerycznego modelu terenu oraz cyfrowego przetwarzania różniczkowego.

W Polsce słowo *matching* tłumaczy się najczęściej jako dopasowanie dwóch lub więcej obrazów (czy raczej ich fragmentów), znajdowanie odpowiednika, rozpoznanie podobnej cechy. I tak procesowi *matchingu* podlegać może obszar grupy pikseli obrazu, zarejestrowany w tablicy (ABM – ang. *Area Based Matching*) bazujący głównie na analizie odcieni szarości w danym fragmencie obrazu lub w przypadku obrazu kolorowego, analizie jednej ze składowych (lub wagowanej kombinacji składowych). W przypadku, gdy procesowi powyższemu podlega jakaś cecha obrazu, mówimy o metodzie FBM (ang. *Feature Based Matching*). Cecha może mieć charakter lokalny np. punkt, krawędzie obiektów lub globalny (np. poligony).

Poszczególne metody możemy scharakteryzować następująco:

- *Area Based Matching* opiera się na analizie obszaru grupy pikseli (porównanie ich skali szarości). W obrazie kolorowym do korelacji wykorzystuje się jeden z kanałów. W metodzie tej porównuje się małe fragmenty obrazów zwanych z ang. *image patches*, a następnie mierzy się ich podobieństwa na podstawie korelacji lub znanych metod najmniejszych kwadratów. *Image matching* wykorzystujący równanie korelacji jest często zwany po prostu „korelacją obrazów”, natomiast wykorzystujący podejścia metod najmniejszych kwadratów: „*matching* najmniejszych kwadratów” (ang. *least squares matching*) oznaczany często LSM.
- *Feature-Based Matching* jest używany przeważnie w grafice komputerowej. Krawędzie lub inne obiekty wydobywane z obrazów oryginalnych są porównywane do odpowiednich, homologicznych obiektów na drugim lub pozostałych obrazach. Podobieństwo liczone jest najczęściej jako funkcja kosztów
- W ostatnich latach coraz częściej wykorzystuje się trzecią metodę: *Symbolic Matching*. Metoda ta porównuje opisy symboliczne używając również funkcji kosztów. Opisy symboliczne mogą odnosić się do skali szarości lub występujących na obrazie obiektów. Mogą być zaimplementowane do systemu jako grafy, drzewa, sieci semantyczne. W porównaniu do poprzednich metod *symbolic matching* nie bazuje na podobieństwie geometrycznym. Zamiast podobieństwa kształtu lub położenia, porównuje własności topologiczne obiektów.

W tabeli 3.1 usystematyzowano podział metod ze względu na sposób pomiaru podobieństwa i podstawę *matchingu*.

Tab.3.1. Relacja pomiędzy metodą, sposobem pomiaru podobieństwa i podstawą *matchingu*.

<i>Metoda matchingu</i>	<i>Sposób pomiaru podobieństwa</i>	<i>Podstawa matchingu</i>
-------------------------	------------------------------------	---------------------------

Area-based	korelacja obrazów, metoda najmniejszych kwadratów	skala szarości
Feature-based	funkcja kosztów	krawędzie, obszary
Symbolic	funkcja kosztów	opis symboli

Praktyczne wykorzystanie *matchingu* sprowadza się głównie do czterech podstawowych etapów:

- wyboru elementów dopasowania,
- znalezienia ich odpowiedników na drugim obrazie (lub kolejnych obrazach),
- obliczenia położenia przestrzennego dopasowywanych elementów,
- oszacowania (kontroli) dokładności dopasowania.

W przypadku fotogrametrii problem *matchingu* sprowadza się głównie do dwóch zadań:

- automatycznego poszukiwania punktów identycznych na lewym i prawym zdjęciu stereogramu,
- automatycznego poszukiwania na zdjęciach takich obrazów, dla których wcześniej znany jest obraz tzw. wzorcowy (np. znaczki tłowe, sygnalizowane krzyże), inaczej mówiąc jest to próba „dopasowania” obrazu rzeczywistego do obrazu wzorca,

W tym pierwszym przypadku mówi się o *matchingu image to image*, w drugim – *image to model*.

Metody oparte na *matchingu* wykorzystywane są w fotogrametrii do różnych celów. Główne zastosowania mają w następujących procesach:

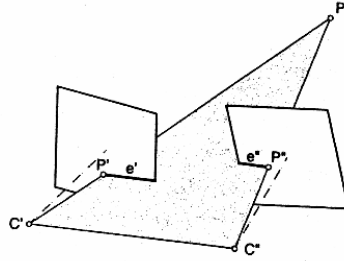
- kalibracji,
- orientacji wewnętrznej,
- orientacji wzajemnej,
- orientacji bezwzględnej,
- aerotriangulacji,
- generowania numerycznego modelu terenu (NMT).

Z racji tego, że wymiary obrazów cyfrowych mogą być znaczące, szukanie odpowiedników na drugim obrazie, mogłoby pochłaniać dużą ilość czasu. W związku z tym wykorzystuje się różne metody celem redukcji obszaru poszukiwań na drugim obrazie.

Zadanie to może być realizowane poprzez:

- wykorzystanie promieni rdzenych,
- wykorzystanie położenia linii pionowych (lub poziomych w przypadku fotogrametrii naziemnej),
- podejście hierarchiczne.
 - *Wykorzystanie promieni rdzennych.*

Metoda promieni rdzennych, opiera się na istnieniu wspólnej płaszczyzny tworzonej przez środki rzutów (ozn. C', C'') zdjęć oraz punkt terenowy P (rys.3.5). Promienie rdzenne tworzą się poprzez przecięcie płaszczyzny rzutującej z płaszczyznami wyznaczanymi przez ramkę tłową. Zwykle promienie rdzenne nie są równoległe do osi x układu tłowego. Wskazane jest zatem transformowanie (*resampling*) obrazu właśnie do takiego układu osi, a wówczas takie stereopary nazywa się obrazami epipolarnymi (lub znormalizowanymi z ang. *normalized images*).

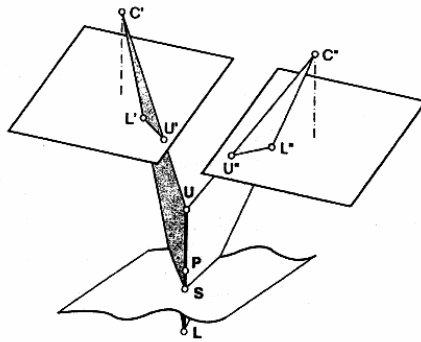


Rys.3.5. Płaszczyzna rdzenna, zdefiniowana przez bazę $C'C''$ i punkt P w przestrzeni przedmiotowej, przecina obrazy tworząc linie e' i e'' .

W metodzie tej wylicza się położenie linii e' , e'' , wówczas zagadnienie odszukania odpowiednika na drugim obrazie sprowadza się do analizy tylko tych linii (nie ma potrzeby analizy całych obszarów). Powoduje to znaczną redukcję obliczeń.

- *Wykorzystanie położenia linii pionowych (poziomych)*

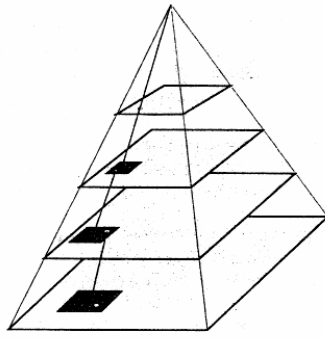
Inną metodą geometryczną badania przestrzennego położenia punktów jest metoda położenia linii pionowych (z ang. *Vertical Line Locus*). Na rys. 3.6 punkt P ma przybliżoną wysokość terenową z zakresu pewnego δz zdefiniowanego punktami L i U . Odcinki $L'U'$ i $U''L''$ powstają jako przecięcie trójkątów SUC' i SUC'' z płaszczyznami zdjęcia. Podobnie jak w pierwszej metodzie obszar poszukiwań ogranicza się do tych odcinków.



Rys.3.6. Koncepcja metody położenia linii pionowych. Obszar przeszukiwania jest związany z projekcją pionowych linii na obu obrazach. Pkt. P jest na przybliżonej wysokości, a S jest prawdziwym (ale nie znanym) poziomem. Przeszukiwanie jest prowadzone wzdłuż odcinków UL . Metoda ta może być stosowana w połączeniu z metodą pierwszą (wykorzystując promienie rdzenne).

- *Podejście hierarchiczne*

Inną metodą redukcji przestrzeni przeszukiwania jest zwiększenie wielkości piksela. Wykorzystują się do tego przygotowane wcześniej piramidy obrazów (rys. 3.7). Najprostszą metodą tworzenia piramidy obrazów jest zapis co drugiego piksela, ale istnieją również metody zmniejszania rozdzielczości obrazu wykorzystując interpolację. W metodzie tej wykorzystana jest zasada „od ogółu do szczegółu”.



Rys.3.7. Piramida obrazów. Proces *matchingu* jest powtarzany na każdym poziomie, aż do znalezienia dokładnej pozycji.

W metodach *matchingu* oprócz samego procesu, ważnym elementem jest kontrola poprawności. Kluczowym zagadnieniem wydaje się więc być analizowanie podobieństwa.

Istnieją w zasadzie trzy główne metody podejścia. Oblicza się:

- wariancję funkcji obrazu, która określa jaki jest poziom różnic odcieni szarości występujących w obrazie - mała wariancja określa duże podobieństwo obrazów,
- autokorelację funkcji obrazu, która dostarcza „samo-porównujący” pomiar fragmentów obrazu - wysoki współczynnik autokorelacji świadczy o dobrym dopasowaniu,
- entropię jako pomiar przypadkowości funkcji obrazu - wysoka entropia tj. np. 8 dla obrazów z 256 (2^8) odcieniami szarości, określa większą przypadkowość niż niska liczba (np. 1 dla obrazów binarnych).

Wartości poszczególnych parametrów mówią o dokładności „dopasowania” szukanych obrazów.

Przykładowe etapy użycia *matchingu* w metodzie ABM:

- lokalizacja wzorca (*ang. location of template*), gdzie w pierwszym etapie wybierana jest lokalizacja wzorca zdefiniowanego wcześniej, środek wzorca natomiast wybierany jest wewnątrz obszaru, który jest połową jego rozmiaru;
- rozmiar wzorca (*ang. size of template*), gdzie rozmiar wzorca jest bardzo istotnym parametrem; wraz ze wzrostem rozmiaru wzorca, wzrasta niepowtarzalność (unikalność) funkcji poziomów szarości, ale również zwiększają się błędy geometrii (dystorsja) obrazu i w tym miejscu należy szukać kompromisu;
- lokalizacja i rozmiar okna przeszukiwania (*ang. search window*), ponieważ area-based matching wymaga bardzo dobrej aproksymacji, dlatego lokalizacja okna przeszukiwania jest sprawą kluczową; jej rozmiar nie jest aż tak istotny, ponieważ konieczność aproksymacji sprowadza problem do wielkości kilku pikseli;
- akceptacja kryterium (*ang. acceptance criteria*); współczynnik pomiaru podobieństwa musi być analizowany, wówczas kryteria akceptacji lub odrzucenia często ulegają zmianie nawet w obrębie tego samego obrazu; wartość progowa lub inne kryteria powinny być określone lokalnie;
- kontrola (*ang. quality control*), która powinna obejmować oszacowanie dokładności i wiarygodności poszukiwanej lokalizacji; dopasowywany punkt musi być analizowany pod kątem wiedzy o położeniu przestrzennym (w odniesionym układzie współrzędnych).

Jedną z prostszych metod *matchingu* jest obliczenie współczynnika korelacji obrazów. Idea korelacji polega na dopasowaniu wzorca zawierającego fragment obrazu cyfrowego do obrazu drugiego operując na nim tzw. oknem przeszukującym (ang. *matching window*) w oparciu o współczynnik korelacji ρ (ang. *correlation factor*).

Współczynnik korelacji jest definiowany jako:

$$\rho = \frac{\sigma_{LR}}{\sigma_L \sigma_R} \quad /3.1/$$

Jeśli ρ jest znormalizowane wówczas : $-1 \leq \rho \leq +1$

σ_{LR} - kowariancja fragmentów obrazów L i R

σ_L - odchylenie standardowe obrazu L (wzorca)

σ_R - odchylenie standardowe obrazu R (okna przeszukującego)

Wprowadzając funkcje obrazu $g_L(x,y), g_R(x,y)$ dla lewego i prawego zdjęcia i obliczając wartość średnią $\overline{g_L}, \overline{g_R}$, otrzymujemy poniższe równania:

$$\overline{g_L} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (g_L(x_i, y_j))}{n \cdot m} \quad /3.2/$$

$$\overline{g_R} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_R(x_i, y_j)}{n \cdot m} \quad /3.3/$$

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (g_L(x_i, y_j) - \overline{g_L})^2}{n \cdot m - 1}} \quad /3.4/$$

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (g_R(x_i, y_j) - \overline{g_R})^2}{n \cdot m - 1}} \quad /3.5/$$

$$\sigma_{LR} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m ((g_L(x_i, y_j) - \overline{g_L})(g_R(x_i, y_j) - \overline{g_R}))}{n \cdot m - 1} \quad /3.6/$$

Znormalizowany współczynnik korelacji przyjmuje wartości w przedziale $\langle -1, 1 \rangle$. Gdy macierz wzorca pokrywa się z macierzą przeszukiwanego okna wówczas współczynnik wynosi 1.

W przypadku braku korelacji współczynnik wynosi 0. Wartość -1 oznacza korelację odwrotną. Ma to miejsce np. w przypadku porównania diapozytywu i negatywu.

Algorytmy korelacji cyfrowej opierają się na analizie podobieństwa pomiędzy dwoma danymi obrazami. Jednym z takich kryteriów jest pole powierzchni określonej na iloczynie dwóch obrazów, liczonej jako funkcja względnego przesunięcia przestrzennego między nimi.

Liczona jest następująco:

$$r(x, y) = f_1(x, y) \otimes f_2(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_1(x', y') f_2(x + x', y + y') dx' dy' \quad /3.7/$$

gdzie:

$r(x, y)$ – funkcja korelacji;

$f_1(x, y); f_2(x, y)$ – funkcje obrazów.

Jeżeli funkcje są dostatecznie podobne, rozwiązaniem równania jest maksimum funkcji $r(x, y)$ w punkcie najlepszego przylegania. Inna definicja miary podobieństwa, która jest mniej czuła na mniejszy poziom, może być zaproponowana np. jako suma bezwzględnych różnic

$$r(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |f_1(x', y') - f_2(x + x', y + y')| dx' dy' \quad /3.8/$$

Z uwagi na to, że obliczanie korelacji jest czasochłonne, stosuje się małe obszary jako fragmenty całości. Stosując miary korelacyjne wymagane jest obliczenie tablicy korelacji $r(i, j)$ dla całej macierzy o wymiarze $i \times j$. Ta czasochłonność spowodowała, że zaczęto poszukiwać dalszych metod. Zaproponowany przez Pratta algorytm zapewniał estymację niedopasowania przy mniejszej liczbie obliczeń. Metodę sekwencyjnego badania zaproponowali Bernea i Silverman.

Obliczany jest błąd ε_S :

$$\varepsilon_S(i, j) = \sum_m \sum_n |F_1(m, n) - F_2(m + i, n + j)| \quad /3.9/$$

Jeśli przekroczy określoną wcześniej wartość graniczną zanim wszystkie $I \times J$ punkty zostaną sprawdzone, przyjmuje się, że sprawdzenie dało wynik negatywny dla danego okna i przystępuje się

do sprawdzania kolejnego okna. Jeśli błąd narasta powoli, wówczas liczba sprawdzanych do momentu przekroczenia limitu jest odnotowywana jako parametr sprawdzenia okna. Po sprawdzeniu wszystkich okien, okno które dostało największą wartość parametru zostaje uznane za właściwie dopasowane.

Obserwacja stereogramów naziemnych (powierzchni terenu) z reguły jest trudniejsza od obserwacji powiechni terenu na zdjęciach lotniczych; przyczyną jest perspektywiczne odwzorowanie i usytuowanie względem płaszczyzny zdjęcia. W tej sytuacji również problematyczne staje się wykorzystanie systemów autokorelacji w FSC.

3.3.2.1. Przegląd stosowanych algorytmów²

Niezadawalająca - z punktu widzenia potrzeb dokładnościowych - rozdzielczość obrazu cyfrowego zmusza na ogół do określania pozycji punktu z dokładnością podpikselową. Specjalistyczne programy umożliwiają uzyskiwanie - w określonych warunkach automatyczne (lub zautomatyzowane) pozycjonowanie punktu z dokładnością rzędu 1/50 piksela (a nawet wyższą). Jest to ułatwione w przypadkach posiadania odpowiednio uzbrojonych sieci wiązek, rozwiązywanych metodą samokalibracji.

W ostatnich latach wiele publikacji fotogrametrycznych poświęcono automatyzacji procesów wykrywania, identyfikacji i pomiaru różnego rodzaju obiektów na zdjęciach cyfrowych. Głównym zadaniem jest wyciągnięcie z obrazu (ekstrakcja) informacji pożądanej przez użytkownika i przekształcenie jej na wymaganą postać, najczęściej wektorową, która stanowi zapis symboliczny obiektów świata rzeczywistego.

Automatyzacja znajduje zastosowanie na różnych etapach procesu opracowania zdjęć naziemnych, lotniczych czy obrazów satelitarnych. Przykładami zastosowań są:

- poszukiwanie położenia wzorca na obrazie (*ang. pattern recognition*) np. automatyczny pomiar znaczków tłowych na etapie orientacji wewnętrznej,
- poszukiwanie odpowiadających sobie fragmentów obrazów na dwu lub większej liczbie obrazów – autokorelacja obrazów, np. pomiar punktów wiążących w semi-automatycznej lub automatycznej aerotriangulacji, pomiar punktów do NMT, rozpoznawanie obiektów liniowych (*ang. edge, line extraction*), np. wyszukiwanie dróg i rzek na zdjęciach lotniczych i obrazach satelitarnych, wykrywanie krawędzi przy tworzeniu modelu 3D budynków, wykrywanie linii w zastosowaniach inżynierskich. Do realizacji poszczególnych zadań opracowano wiele algorytmów różniących się założeniami, efektywnością i dokładnością, które stanowią moduły systemów przetwarzania obrazów. Istnieje również wiele innych ciekawych algorytmów opisanych w literaturze, nie będących jednak częścią systemów komercyjnych.

Typowa procedura wykrywania elementów liniowych obejmuje następujące etapy [*Fuchs, Heuel 1998*]:

- wytypowanie podobszarów, przez które mogą przechodzić elementy liniowe,
- identyfikacja pojedynczych pikseli z podobszarów, które z największym prawdopodobieństwem stanowią jedno-pikselowej szerokości łańcuch sąsiadujących pikseli,
- określenie parametrów charakteryzujących piksele elementu liniowego np. precyzyjne, podpikselowe (w liczbach rzeczywistych) określenie położenia piksela, dokładność, orientacja linii itp.,
- połączenie i uszeregowanie pikseli należących do jednego elementu liniowego,

² Opracowano na podstawie W. Mierzwa, S. Mikrut : „*Automatyczna identyfikacja elementów liniowych na obrazach cyfrowych*”, Kraków, 2000.

- aproksymacja łańcucha pikseli wybraną funkcją, np. prostą, łamaną, krzywą itp.

Typowanie podobszarów może być przeprowadzone trzema sposobami:

- przez dopasowanie wzorca wymagające zdefiniowania różnych wzorców elementów liniowych (model, orientacja, szerokość itp.),
- przez dopasowanie modelu parametrycznego, polegające na lokalnej aproksymacji powierzchni jasności obrazu nachyloną płaszczyzną,
- z wykorzystaniem gradientów; na podstawie pochodnych funkcji jasności oblicza się dla każdego piksela kierunek i wartość gradientu, na podstawie których klasyfikuje się piksel do podobszaru.

Wydzielone w tym etapie podobszary będą miały na ogół szerokość kilku pikseli.

W następnym etapie są one „pocieniane” do szerokości jednego piksela. Stosowane są następujące rozwiązania: jako piksel należący do elementu liniowego wybierany jest piksel środkowy linii podobszaru lub przez analizę pierwszej i drugiej pochodnej obliczanej dla każdego piksela, określane jest jego najbardziej prawdopodobne położenie.

Kolejny etap jest etapem pośrednim przy przejściu z zapisu rastrowego (przedstawienie ikonograficzne) do zapisu symbolicznego. Dla każdego piksela określane są następujące parametry zapisywane jako jego atrybuty:

- współrzędne – dokładne współrzędne punktu elementu liniowego wyrażone w liczbach rzeczywistych mogą być określone przez aproksymację wielomianami trzeciego, drugiego i pierwszego stopnia odpowiednio funkcji jasności i jej pierwszej i drugiej pochodnej w kierunku gradientu a następnie przez określenie punktu przegięcia, maksimum lub punktu zerowego odpowiednich wielomianów; w zależności od wymiarów przyjętego okna i wartości gradientu można spodziewać się dokładności na poziomie 0.02 – 0.2 wielkości piksela [Streilein, 1996, Trocha, 1993, Jachimski, Mikrut, 1998], oraz

- kierunek, krzywizna, kontrast, średnia wartość jasności itp.

W następnym etapie grupuje się i szereguje piksele należące do tego samego elementu liniowego. Elementy liniowe mają skończone wymiary i mogą się przecinać; w związku z tym musimy wytypowane piksele zakwalifikować do jednej z trzech kategorii:

- jako należące do elementu liniowego (mają tylko dwóch sąsiadów),
- jako punkty przecięcia (mają co najmniej trzech sąsiadów),
- jako punkty końcowe (mają tylko jednego sąsiada).

Ostatnim etapem jest aproksymacja łańcucha punktów odpowiednio dobraną funkcją w zależności od rodzaju wykrytego obiektu.

3.3.2.2. Procedury automatyczne w autografii cyfrowym VSD.

Proces pomiaru automatycznego realizowanego na autografii cyfrowym VSD oparty jest na kilku trybach pomiarowych. Pierwszym trybem jest pomiar punktów homologicznych do orientacji wzajemnej. Wykorzystano tutaj metodę półautomatyczną nieparametryczną dwuwymiarową. Do uruchomienia procedury operator autografu ustawia kursor na lewym i prawym zdjęciu na punktach homologicznych (z dokładnością około 25 pikseli ekranowych). Operator ma możliwość wyboru: czy wyszukiwanie ma się odbywać na lewym czy na prawym zdjęciu. Po uruchomieniu procedury operator ocenia czy poszukiwanie zakończyło się powodzeniem. Oceny dokonuje wzrokowo.

Drugi tryb oparty jest na prawidłowo wykonanej orientacji wzajemnej stereogramu i uruchomieniu autogrametrycznego trybu sterowania. Jest półautomatyczną strategią parametryczną jednowymiarową oparta tym samym kryterium podobieństwa jak poprzednio i realizowana na promieniu rdzennym drugiego obrazu odpowiadającym wskazanemu punktowi na pierwszym obrazie

Trzeci tryb wspomagania ma charakter automatyczny z ręczną korektą w przypadku utracenia nawiązania pomiędzy obrazami. Jest strategią parametryczną jednowymiarową z kontrolą poprawności dostosowania i dołączaniem dodatkowych kryteriów podobieństwa.

Jakość wspomagania zależy tu jeszcze silniej niż dla poprzednich trybów od treści obrazów, struktury szczegółów i odkształceń geometrycznych [Zieliński, 1998].

3.3.2.3. Wybrane przykłady ekstrakcji krawędzi z podpikselową dokładnością

Pomiar obiektów (*ang. features*) może odbywać się w sposób półautomatyczny, wówczas wymagana jest interwencja użytkownika, który decyduje które krawędzie chce wydobyć z obrazu. Pierwszym krokiem jest użycie operatora krawędziującego np. Sobela (działającego w kierunkach prostokątnych) w celu obliczenia gradientu. Każdy piksel obrazu ma przydzieloną wartość gradientu, który posiada swój kierunek i wartość.

Wartość gradientu jest obliczana z wzoru:

$$g(x, y) = \sqrt{g_r(x, y)^2 + g_c(x, y)^2} \quad /3.10/$$

gdzie:

$g(x, y)$ – wartość jasności

$g_r(x, y)$, $g_c(x, y)$ – pochodne cząstkowe wzdłuż wierszy i kolumn, natomiast kierunek gradientu

jest obliczany jako:

$$\theta(x, y) = \arctan(g_c(x, y) / g_r(x, y)) + 90^\circ \quad \text{dla } -\pi < \theta < \pi \quad /3.11/$$

Podpikselową dokładność położenia krawędzi uzyskuje się poprzez wpasowanie wielomianu drugiego stopnia (parabola) wzdłuż kierunku gradientu. Współczynniki paraboli są wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów.

Wykrywanie obiektów liniowych dotyczy nie tylko fotogrametrii bliskiego zasięgu - jak to ma miejsce w systemie DIPAD. „*Feature extraction*” stosuje się również dla zobrazowań satelitarnych. Andreas Busch [Busch, 1996] przedstawił metodę, którą wykorzystał przy wykrywaniu linii i krawędzi na obrazach SPOT-a i KWR 1000. Wykorzystał ogólny model dla linii i krawędzi, które mają wspólne matematyczne podłoże. Model krawędzi jest funkcją wielomianową trzeciego stopnia, która jest wpasowana w skalę szarości dla odpowiedniego okna obrazu („*image window*”). Jest to tzw. model ściankowy („*facet model*” - podany przez Haralicka w 1983). Wielomian jest reprezentowany przez wartości jasności piksela jako funkcja kolumn i wierszy dla wybranego okna obrazu:

$$g(x, y) = k_0 + k_1x + k_2y + k_3x^2 + k_4xy + k_5y^2 + k_6x^3 + k_7x^2y + k_8xy^2 + k_9y^3 \quad /3.12/$$

Współczynniki k_i są wyliczane przez wpasowanie wielomianu metoda najmniejszych kwadratów w wybrane okno obrazu.

Stąd pochodzi wielomian drugiego stopnia:

$$g(x, y) = k_0 + k_1x + k_2y + k_3x^2 + k_4xy + k_5y^2 \quad /3.13/$$

Ponieważ wybrane okno obrazu może mieć dowolną wielkość (a także poziomy jasności pikseli mogą się odnosić do różnych modeli jak Sobel czy Prewitt) dlatego model wielomianowy oferuje dobrą elastyczność wpasowania. Decyzja czy dany piksel jest pikselem krawędzi (*edge pixel*) czy linii (*line pixel*) jest brana z pierwszej i drugiej pochodnej funkcji wielomianowej. Dla wykrycia krawędzi obliczane jest przecięcie wielomianu (wzór 3.12) z kierunkiem nachylenia wektora gradientu. Centralny piksel w wybranym oknie obrazu jest klasyfikowany jako piksel krawędzi jeśli maksimum pierwszej pochodnej z funkcji wielomianu jest zlokalizowane wewnątrz piksela i różni się znacznie od zera. Piksele linii natomiast są wykrywane jako przecięcie paraboli (wzór 3.13), w kierunku maksymalnej krzywizny. Przykładowy piksel jest pikselem linii w miejscu zerowania się pierwszej pochodnej, tzn. jeśli ekstremum paraboli znajduje się w środku piksela i jeśli krzywizna paraboli jest dostatecznie duża. W tej procedurze dochodzimy do podpikselowej dokładności.

Badania nad algorytmami dotyczącymi wykrywania krawędzi z podpikselową dokładnością na obrazach cyfrowych są prowadzone również w Polsce. Analiza algorytmów opartych o analizę zmian jasności pikseli wzdłuż przekrojów obrazu cyfrowego została przedstawiona w pracy doktorskiej W. Trochy [Trocha 1993].

Badania testowe wykonane w laboratorium Zakładu Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH polegały na lokalizacji siatki złożonej z krzyży, które rejestrowane były kamerą CCD. Jak na owe czasy była to praca nowatorska, a uzyskane wyniki wykazywały dokładność lokalizacji krawędzi rzędu jednej dziesiątej do jednej dwudziestej średnicy piksela co było zaskakująco dobrym rezultatem [Jachimski, Trocha 1992; Trocha 1993].

W swojej pracy W. Trocha przedstawił kilka ciekawych metod określania położenia krzyży siatki *reseau*. Co prawda obecnie znane są metody pozwalające na dokładniejszą lokalizację, niemniej jednak z przedstawionych przez autora metod (obok interpolacji na wykresie rozkładu jasności czy aproksymacji wykresu rozkładu jasności funkcją matematyczną) ciekawa jest metoda progowania. Mimo że dokładność uzyskiwana nie jest wysoka (rzędu - jak podaje autor- 0.5 piksela), to jednak z uwagi na swą prostotę i szybkość obliczeń może być zalecana do zgrubnego określania interesującego nas położenia, co najczęściej jest pierwszym niezbędnym krokiem przy precyzyjnym wyznaczaniu przebiegu linii.

Wspomniane wcześniej uzyskiwanie wyższych dokładności odbywa się obecnie poprzez wykorzystanie drugiej pochodnej obrazu cyfrowego, obliczanej dla obrazów poddanych filtracji z użyciem operatora Laplace'a.

Analiza obrazu prowadzona dla szeregu sąsiadujących ze sobą przekrojów pozwala na podpikselowe zlokalizowanie punktów, w których badany kontur przecinany jest osiami przekrojów. Punkty te aproksymowane są następnie równaniem prostej, która wpasowywana jest z zachowaniem reguł najmniejszej sumy kwadratów odchyłek. Lokalizacja takiej prostej aproksymującej położenie konturu obiektu na obrazie cyfrowym określana jest z dokładnością podpikselową.

Opisane procedury wykrywania krawędzi z podpikselową dokładnością znalazły zastosowanie do określania naprężeń lin odciągowych w czasie „prawie” rzeczywistym. Technologia ta zostanie opisana w podrozdziale 5.3.2. Opracowany system będzie mógł być prawdopodobnie stosowany do pomiaru anomalii kształtu i położenia takich obiektów jak kominy przemysłowe, chłodnie kominowe, czy inne obiekty o wyraźnych konturach.

3.4. Przykłady zastosowań fotogrametrii cyfrowej

Doświadczenia prowadzone na całym świecie od kilkunastu lat są ukierunkowane na poszukiwanie metod pozwalających w sposób zautomatyzowany wykrywać elementy liniowe w obrazie. Jednym z prekursorów stosowania metod półautomatycznych w procesie tzw. „*feature extraction*” jest Andre Streilein [Streilein, 1996]. W systemie zaprojektowanym w ETH Zurich o nazwie DIPAD (*Digital Photogrammetry and Architectural Design*) połączono metody fotogrametrii cyfrowej z możliwościami jakie stwarzają współczesne systemy CAD. W systemie tym model CAD danego obiektu jest używany zarówno *a priori* jak i *a posteriori*. Użytkownik określa część położenia obiektu w środowisku CAD poprzez podanie topologii, która jest następnie wykorzystana z obrazami cyfrowymi poprzez algorytmy fotogrametryczne. W rezultacie model obiektu jest z powrotem transformowany do środowiska CAD. Pomocne w tym są algorytmy pozwalające na wykrycie linii krawędziowych, na bazie których powstaje bardziej szczegółowy model 3D z precyzyjnie z wyznaczonymi obiektami liniowymi.

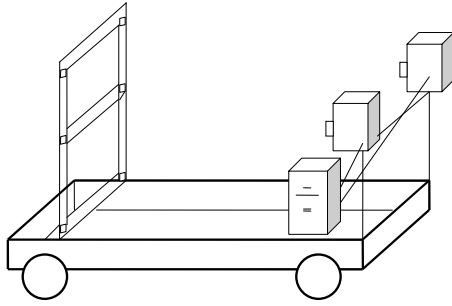
Inny system, opisany przez autorów [Schneider, 1996, DPA, 2002], służący do pomiarów 3D oparty o kamerę cyfrową Kodak DCS 760 lub BlueCam (1.5 mln. pikseli) może służyć do precyzyjnych pomiarów budowli inżynierskich, maszyn, konstrukcji czy urządzeń w przemyśle okrętowym, samolotowym. W systemie tym pomiar odbywa się w sposób automatyczny, a współrzędne punktów wyznaczane są metodą przestrzennej teratriangulacji razem z procesem samokalibracji kamery cyfrowej. Wyniki poddawane są szczegółowej analizie dokładnościowej oraz statystycznej, co pozwala oszacować przydatność systemu do docelowych zagadnień.

Zastosowania cyfrowe nie ominęły również fotogrametrii inżynieryjno-przemysłowej. W Zakładzie Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH od kilku lat prowadzone są badania dotyczące wdrożeń technik cyfrowych w zastosowaniach inżynierskich. Opracowanie „videostereodigitizeza” VSD-AGH pozwoliło na wykorzystanie go w szeregu zagadnień związanych z pracą na cyfrowych obrazach. Rozwinięto również techniki związane z automatycznym wykrywania krawędzi czy linii. Opracowano system pozwalający na automatyczne śledzenie zarejestrowanych na obrazie cyfrowym przebiegi lin. Zaletą systemu jest autorskie oprogramowanie pozwalające na dalszy rozwój oraz wykorzystywanie go w szerszym zakresie, o czym szerzej w rozdziale 5.

W AGH powstał również system do monitorowania przebiegu skrajni kolejowej [Tokarczyk, Mikrut, 1999, 2000]. System oparty na dwóch aparatach cyfrowych pozwala na wykonywanie przekrojów skrajni kolejowej w dowolnym momencie czasu. System umiejscowiony jest na specjalnym wagonie kolejowym poruszającym się po torach kolejowych rejestrując w dwóch plikach graficznych z każdego z aparatów w odpowiednim czasie fragment przestrzeni przedmiotowej. Po rejestracji i zgraniu danych, wymagane orientacje (wewnętrzna, wzajemna oraz bezwzględna) i pomiar zdjęć odbywa się na komputerze, a wyniki mogą być prezentowane zarówno na komputerze jak i poprzez wydruk.

System ten - w związku z faktem, że na wagonie jest zainstalowana rama ze znanymi elementami orientacji bezwzględnej (rys. 3.8) - w pierwszej kolejności sprawdza powtarzalność orientacji. Jeśli orientacja jest zachowana (a takie jest założenie systemu) wówczas można przejść do następnego etapu, czyli obrysowywania skrajni.

Jeżeli orientacja jest zmieniona, wówczas należy wykonać ją powtórnie i przejść do kolejnego etapu pracy systemu, czyli wektoryzacji obrysu skrajni kolejowej.



Rys.3.8. Szkic systemu służącego do pomiaru skrajni kolejowej. Na specjalnie przygotowanym wagonie umieszczone jest ramy z elementami do wyznaczania orientacji bezwzględnej oraz zestaw kamer z komputerem.

Zadaniem systemu jest wyznaczenie obrysu skrajni kolejowej na dowolnym kilometrze trasy w trakcie jazdy pociągu. Wyniki w postaci linii wektorowych obrysu skrajni na poszczególnych kilometrach, służą do określania maksymalnych kubatur obiektów, które mogą zostać poddane transportowi kolejowemu.

4. Analityczne metody stosowane w fotogrametrii inżynierskiej

Większość pomiarów zaliczanych do geodezji inżynierskiej, czy fotogrametrii inżynierskiej ma na celu wyznaczenie współrzędnych punktów kontrolowanych, np. w celu określenia odchyłek projektowych.

Wyznaczenie współrzędnych może także być etapem badania odkształceń (gdzie nie stosuje się metody różnicowej). Zadanie to jest jednak – w przypadku fotogrametrii – bardziej złożone, bowiem zdjęcia pomiarowe, nawet wykonane zrektyfikowaną kamerą pomiarową, są obarczone błędami orientacji, oraz błędami obrazowania. Dążąc do uzyskania satysfakcjonującej dokładności określenia współrzędnych terenowych, koryguje się wyniki pomiaru zdjęć, stosując rozmaite metody analityczne. Stosowane metody obliczania współrzędnych terenowych punktów można podzielić na dwie główne grupy:

- metody wykorzystujące przekształcenie przez obrót,
- metody wykorzystujące przekształcenia rzutowe.

4.1. Metody oparte na przekształceniu przez obrót

Wśród rozwiązań analitycznych opartych na przekształceniach przez obrót można wyróżnić 3 podstawowe metody:

- a) pojedynczej (niezależnej) wiązki,
- b) stereogramu (dwie wiązki),
- c) sieci wiązek.

Ad a) Dla każdej wiązki (zdjęcia) określa się oddzielnie elementy orientacji i dopiero na etapie wyznaczania współrzędnych punktu są one wykorzystywane wspólnie do wykonania wcięcia w przód. Elementy orientacji wewnętrznej są znane z kalibracji. Liniowe elementy orientacji (X_o, Y_o, Z_o) wyznacza się zazwyczaj w terenie. Kątowe elementy orientacji (φ, ω, κ) albo są znane, albo wyznaczane, bądź tylko korygowane w oparciu o punkty kontrolne. Zależność między współrzędnymi tłowymi i terenowymi określa równanie kolinearności:

$$\vec{X} = \lambda A \vec{x} \quad /4.1/$$

gdzie: $\vec{x} = [x, c_k, z]^T$, $\vec{X} = [X, Y, Z]^T$

$$A = \begin{bmatrix} \cos\varphi \cos\kappa - \sin\varphi \sin\omega \sin\kappa & , & -\sin\varphi \cos\omega & , & \cos\varphi \sin\kappa + \sin\varphi \sin\omega \cos\kappa \\ \sin\varphi \cos\kappa + \cos\varphi \sin\omega \sin\kappa & , & \cos\varphi \cos\omega & , & \sin\varphi \sin\kappa - \cos\varphi \sin\omega \cos\kappa \\ -\cos\omega \sin\kappa & , & \sin\omega & , & \cos\omega \cos\kappa \end{bmatrix} \quad /4.2/$$

Do wyznaczenia kątowych elementów orientacji zawartych w macierzy A wykorzystuje się punkty kontrolne. Rozwiązanie układu równań kolinearności (typu 4.1) dostarcza szukanych współrzędnych terenowych pomierzonych punktów (X, Y, Z).

Odmienne wykorzystanie macierzy obrotu umożliwia transformację przestrzennych współrzędnych tłowych (x, c_k, z) do układu zdjęć poziomych.

$$[x_t, y_t, z_t]^T = A[x, c_k, z]^T \quad , \quad /4.3/$$

Współrzędne transformowane można przekształcić we współrzędne : "ekwiwalentne" – zdjęcia poziomego i zorientowanego kierunkowo - przyjmując najdogodniejszą wartość „ y_e ”:

$$x_e = \frac{y_e}{y_t} x_t \qquad z_e = \frac{y_e}{y_t} z_t \qquad /4.4/$$

Zazwyczaj przyjmuje się $y_e=c_k$ – wtedy otrzymujemy współrzędne tłowe zdjęcia poziomego i zorientowanego kierunkowo, ale można podstawić odległość terenową $d=y_e$, otrzymując terenowe współrzędne płaskie. Ten drugi przypadek został wykorzystany w procedurze opisanej w rozdziale 2.3.2.

Obliczone wg. wzoru 4.3 współrzędne można także wykorzystać do obliczenia kątów: poziomego (względem osi kamery):

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{x_t}{y_t} \qquad /4.5/$$

oraz pionowego:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{z_t \cos \gamma}{y_t} \qquad /4.6/$$

Dalsze obliczenia (współrzędnych terenowych) można wykonać stosując klasyczne rozwiązania sieci kątowych; będzie to trzecie podejście (obok wykorzystujących wzory 4.1 i 4.4).

Na potrzeby opracowania zdjęć niemetrycznych (lub metrycznych o niepewnych elementach orientacji) stworzono metodę „kalibracji w trakcie rozwiązywania zadania pomiarowego” (*on the job callibration*). Jej zasady opisano w literaturze (np. [Bernasik, Tokarczyk, 1991]).

Ad b) Metoda stereogramu jest specyficznym sposobem wykorzystania dwóch wiązek, szeroko stosowanym ze względu na możliwość równoczesnej (stereoskopowej) obserwacji obu zdjęć. Do dokładnych pomiarów inżynierskich rzadko jest stosowana, ze względu na duże błędy określenia współrzędnej prostopadłej do bazy. Transformowane współrzędne tłowe (x_t, y_t, z_t) umożliwiają obliczanie współrzędnych terenowych według prostych wzorów zdjęć normalnych czy zwróconych.

Ad c) W przypadku samokalibracyjnego rozwiązywania sieci wiązek (czy terratriangulacji) postępowanie jest odmienne: już na etapie ustalania elementów orientacji wiązki są łączone w jedną, wspólną, przestrzenną sieć geometryczną, przy uwzględnieniu warunków przecinania się wszystkich jednoimiennych promieni do punktów obiektu pomiaru. W jednym etapie wylicza się zarówno elementy orientacji zdjęć (wraz z błędami obrazowania), jak i szukane współrzędne punktów. Dla wielu zdjęć tworzy się przestrzenną sieć przecinających się kierunków - do punktów znanych jak i wyznaczanych. Takie postępowanie przynosi znaczne korzyści: poprzez silne związanie geometryczne sieci przestrzennej można ograniczyć liczbę punktów kontrolnych; także z punktu widzenia zasad wyrównania obserwacji, takie postępowanie jest bardziej poprawne. Niewiadome (w tym błędy obrazowania) są wyznaczane nie tylko na podstawie punktów kontrolnych, ale z wszystkich punktów mierzonych na wielu zdjęciach. Ten sposób rozwiązania sieci wiązek nosi nazwę *samokalibracji*. Charakteryzuje go złożoność algorytmów i oprogramowania. Wymagana jest znaczna liczba nadliczbowych zdjęć.

Podstawę postępowania obliczeniowego stanowią – jak wiadomo – punkty kontrolne. Liczba i rozmieszczenie punktów kontrolnych zależą od zastosowanej metody. Bez punktów kontrolnych obywają się oczywiście – najmniej pracochłonne - metody oparte na danych nominalnych; obliczenie współrzędnych przeprowadza się po wprowadzeniu danych polowych do odpowiednich wzorów.

Wśród metod zakładających korekcję, najpopularniejsze są korekcje kątowych elementów orientacji kamery – wystarczają do tego 3 punkty kontrolne (dla każdego zdjęcia); w przypadku korekcji błędów obrazu niezbędna jest znajomość 5 – 8 punktów (dla każdego zdjęcia). Najmniejsze wymagania – wzięwszy pod uwagę liczbę stosowanych zdjęć – mają rozwiązania sieci wiązek rozwiązywane na drodze samokalibracji – 3 punkty XYZ.

W klasycznych rozwiązaniach opierających się na geometrii podobieństw pewien problem stwarza znalezienie wartości kątowych elementów orientacji wiązki, uwikłanych w funkcje wyrazów ortogonalnej macierzy obrotu. Z tego powodu, większość operacji obliczeniowych wymagała postępowania iteracyjnego. Niedogodność ta nie występuje w rozwiązaniach analitycznych wywodzących się z geometrii rzutowej.

4.2. Metody wykorzystujące zależności rzutowe

Geometria rzutowa zajmuje się przekształceniami utworów geometrycznych w przestrzeni rzutowej. Za przestrzeń rzutową uważa się przestrzeń euklidesową wzbogaconą o *elementy niewłaściwe*: punkt niewłaściwy (prostej), prostą niewłaściwą (płaszczyzny), płaszczyznę niewłaściwą (przestrzeni). *Przekształcenia rzutowe* są rezultatem: rzutowania (z punktu – dla nas najważniejsze, albo z prostej), lub przecinania (płaszczyzną – dla nas najważniejsze, lub prostą).

Utwory – to zbiory *elementów zasadniczych* (punktów, prostych, płaszczyzn); dla nas najważniejszymi utworami są: płaszczyzna punktów (zbiór punktów należących do tej samej płaszczyzny), wiązka prostych (zbiór prostych przestrzeni mających jeden wspólny punkt), przestrzeń punktów (zbiór punktów przestrzeni).

Pojęcie elementów niewłaściwych należy rozumieć następująco: proste równoległe mają wspólny punkt niewłaściwy ($w \pm \infty$), płaszczyzny równoległe przecinają się we wspólnej prostej niewłaściwej ($w \infty$), przestrzeń punktów posiada płaszczyznę niewłaściwą ($w \infty$).

Utworami wzajemnie rzutowymi nazywamy takie utwory, które powstały w wyniku skończonej liczby przekształceń (rzutowań, lub przecinań); dadzą się one zawsze sprowadzić do położenia perspektywicznego – tzn. do położenia w którym jeden jest rzutem lub przecięciem drugiego.

Wzajemną rzutowość dwóch płaszczyzn punktów (np. płaszczyzny fotogramu i płaskiej powierzchni – elewacji budynku, czy płaskiego terenu) określają cztery elementy - na przykład cztery pary odpowiadających sobie punktów, pod warunkiem, że żadne trzy nie leżą na tej samej prostej.

Zapisem matematycznym który określa wzajemną rzutowość tych utworów są równania:

$$x = \frac{aX + bY + c}{dX + eY + 1} \quad y = \frac{fX + gY + h}{dX + eY + 1} \quad /4.7/$$

Liczba występujących współczynników (a ... h) potwierdza wcześniejsze twierdzenie - cztery pary punktów, dla których możemy zapisać (łącznie) 8 równań, pozwalają obliczyć wartości 8 współczynników.

Zależności te opatruje się zastrzeżeniem matematycznym wykluczającym przynależność trzech punktów do jednej prostej. We wzorach tych, XY i xy to ortokartezjańskie układy współrzędnych (np. współrzędne tłowe i terenowe).

Inną parę utworów, których wzajemna rzutowość może mieć praktyczne znaczenie stanowią: płaszczyzna punktów (fotogramu) i przestrzeń punktów (mierzonego obiektu). Zapis matematyczny tej zależności jest znany pod nazwą DLT (*ang. Direct Linear Transformation* – bezpośrednia transformacja liniowa):

$$x = \frac{aX + bY + cZ + d}{eX + fY + gZ + 1} \quad y = \frac{hX + jY + kZ + l}{eX + fY + gZ + 1} \quad /4.8/$$

Ze względu na liczbę współczynników (11) zależność ta nazywana jest także „jedenastoparametrową”.

Na zakończenie tego rozdziału należy uczynić zastrzeżenie: skromny wymiar wykładów „fotogrametrii inżynierskiej” zmusza do skrótowego potraktowania tej geometrii i powyższe wprowadzenie należy traktować jako zarys nie pozwalający stosować tego narzędzia matematycznego bez pełnego zapoznania się.

4.3. Określanie przemieszczeń i odchylek projektowych metodą różnicową

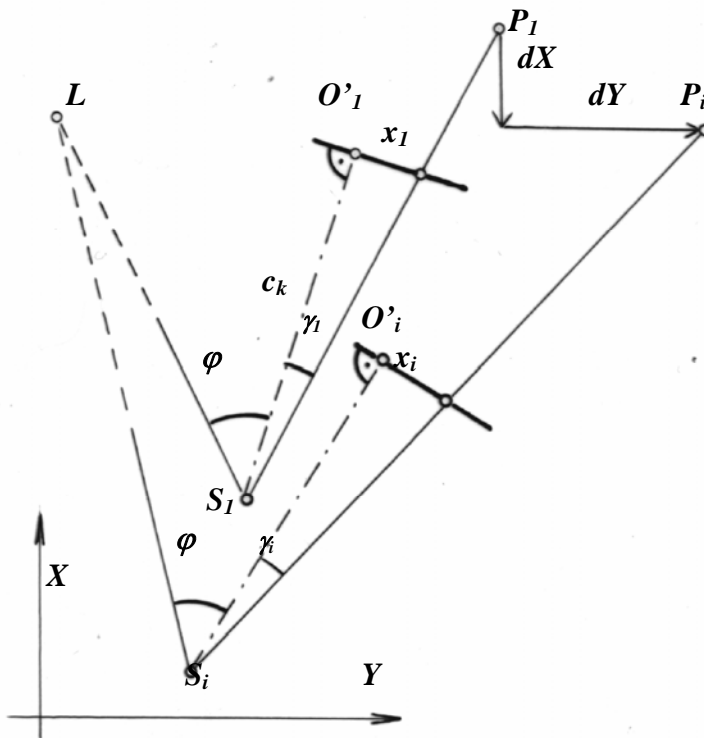
Odkształcenia budowli i urządzeń są analizowane w oparciu o przemieszczenia punktów kontrolowanych, wyznaczane w trakcie okresowych pomiarów. Wektor przemieszczenia, które nastąpiło pomiędzy stanem pierwotnym „1” i wtórnym „i” jest określony trzema składowymi:

$$\begin{aligned} \Delta X &= X_i - X_1, \\ \Delta Y &= Y_i - Y_1, \\ \Delta Z &= Z_i - Z_1. \end{aligned} \quad /4.9/$$

Wartości tych składowych można określić na drodze *porównania współrzędnych* wyznaczonych w poszczególnych stanach – co opisują powyższe równania, albo metodą *różnicową*. Metoda porównywania współrzędnych jest więc oparta o dwa niezależne pomiary, których wyniki (poszczególne współrzędne) odejmuje się od siebie. Natomiast metoda różnicowa zakłada bezpośrednie określanie składowych przemieszczenia, jako funkcji różnic obserwacji - np. przyrostów kątów, czy przyrostów współrzędnych tłowych – często mierzonych jako paralaksy czasowe – podłużne (p), czy poprzeczne (q):

$$\begin{aligned} \Delta X &\cong dX = f_1(p, q) \\ \Delta Y &\cong dY = f_2(p, q) \\ \Delta Z &\cong dZ = f_3(p, q) \end{aligned} \quad /4.10/$$

Ze względu na założenie niewielkich przemieszczeń nie jest to metoda ścisła. Metoda była powszechnie stosowana przed „rewolucją komputerową”; obecnie jest stosowana rzadziej, ale w fotogrametrii dość często - ze względu na sposób „par czasowych”, pozwalający bezpośrednio mierzyć przyrosty obserwacji, jako „paralaksy czasowe” (p), oraz prostotę obliczeń i łatwość oprogramowania (nawet na kalkulatorze). Stosowanie metody różnicowej stawia warunek zachowania – w trakcie okresowych pomiarów – tych samych stanowisk pomiarowych, zaś w przypadku metody fotogrametrycznej, także zachowania takiej samej orientacji: wewnętrznej (te same kamery) i zewnętrznej (taka sama orientacja kamer). Niewielkie zmiany tych elementów powinny być uwzględniane w obliczeniach np. w formie poprawek korekcyjnych.



Rys.4.1. Kąty poziome i współrzędne tłowe na zdjęciach poziomych w dwóch stanach („l” i „i”)

Porównanie przyrostów współrzędnych tłowych: pomierzonego $\Delta x = x_i - x_l$, oraz dx - wynikającego z przemieszczenia punktu (rys. 4.1) , pozwala zapisać równanie poprawki [Bernasik, 1983]:

$$\Delta x - dx = v \quad /4.11/$$

które ze względu na zależność różniczkową:

$$dx = \frac{c_k}{\cos^2 \gamma} d\gamma$$

przyjmuje postać równania:

$$a dX - b dY + \Delta x = v \quad /4.12/$$

gdzie:

$$a = \frac{\Delta Y * c_k}{d^2 * \cos^2 \gamma} \quad b = \frac{\Delta X * c_k}{d^2 * \cos^2 \gamma} \quad \Delta X = X_{punktu} - X_{stanow.}, \quad \Delta Y = Y_{punktu} - Y_{stanow.},$$

$\gamma = \arctg \frac{x}{c_k}$, d - przybliżona odległość punktu P. od stanowiska.

W praktyce pomiarowej wykorzystuje się zależność /4.12/ nie tylko do obliczania poziomych składowych przemieszczeń, ale również do obliczania niewielkich odchyień od postaci teoretycznej – np wychyleń od pionu.

Jeżeli nie występują spostrzeżenia nadliczbowe (są dwa stanowiska), to zamiast rozwiązywać dwa równania typu /4.12/, stosuje się stałą (przy okresowych pomiarach) macierz transformującą:

$$\begin{bmatrix} dX \\ dY \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta X_2 d_1^2 \cos^2 \gamma_1}{m_1} & \frac{-\Delta X_1 d_2^2 \cos^2 \gamma_2}{m_2} \\ \frac{\Delta Y_2 d_1^2 \cos^2 \gamma_1}{m_1} & \frac{-\Delta Y_1 d_2^2 \cos^2 \gamma_2}{m_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} \quad /4.13/$$

gdzie – w zależności od stałej kamery (c_k) użytej na stanowiskach „1” i „2” – „ m ” przyjmuje wartość: $m_1 = c_{k1} (\Delta X_1 \cdot \Delta Y_2 - \Delta X_2 \cdot \Delta Y_1)$ i analogicznie m_2 .

Zależność powyższa może być także stosowana w przypadku obserwacji kątowych; wprowadza się wtedy zmiany: w miejsce c_k pojawia się ρ (sekundowe), $\cos \gamma = 1$, a zamiast Δx wprowadza się $\Delta \alpha$.

Ze względu na wzmiankowaną przybliżoność, nie należy stosować metody różnicowej, jeśli stosunek przemieszczenia do odległości fotografowania jest większy od założonego błędu względnego określenia przemieszczenia. Jeśli jednak w trakcie obliczeń okazałoby się, że wielkość przemieszczenia wyklucza stosowanie metody różnicowej, to trzeba jedynie uściślić obliczenia; różnicowy pomiar par czasowych dostarczył bowiem nie tylko paralaks czasowych, ale i współrzędnych tłowych aktualnych; trzeba więc wtedy obliczyć współrzędne tłowe stanu pierwotnego, a następnie wykonać obliczenia ścisłym sposobem porównania współrzędnych.

Jak już wspomniano, warunkiem stosowania metody różnicowej jest zachowanie – w trakcie okresowych pomiarów - tej samej orientacji zewnętrznej kamer; z tego względu pomiary przemieszczeń bezwzględnych nie mogą się obyć bez punktów kontrolnych, stanowiących podstawę korekcji wpływu

ewentualnych zmian. Najtrudniej jest – w warunkach przemieszczeń stanowisk kamer – uwzględnić wpływ zmiany kąta zwrotu ($\Delta \varphi$). Warto jednak zwrócić uwagę na zaniedbywalność drobnych zmian zwrotu w przypadku określania *przemieszczeń względnych*. Dlatego też, pomiary odchyień od pionowości, oraz ich zmian (przemieszczeń względnych) można wykonywać różnicowo nawet na terenach górniczych, gdzie decymetrowe przemieszczenia stanowisk i związane z tym znaczne zmiany orientacji kamer nie wykluczają stosowania metody różnicowej i nie wymagają wprowadzania korekt. Gdy jednak kontrola stałości stanowisk wskazuje na niedopuszczalnie duże ich przemieszczenia, to w przypadku pomiaru *przemieszczeń bezwzględnych* uzupełnia się człon „ dx ” równania /4.11/ w sposób opisany w literaturze [Bernasik, Tokarczyk 1991]. Ze względu na rzadkość stosowania różnicowego sposobu obliczeń w przypadku okresowych pomiarów przemieszczeń bezwzględnych, to postępowanie obliczeniowe nie będzie przytaczane.

4.4. Oprogramowanie metod analitycznych stosowanych w fotogrametrii inżynierskiej

Na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat opracowano, oprogramowano i efektywnie zastosowano wiele analitycznych metod rozwiązujących fotogrametryczne wcięcie w przód (pojedyncze, lub wielokrotne). Jednym z głównych czynników warunkujących ich rozwój były aktualne możliwości techniki komputerowej.

Na potrzeby pomiarów bliskiego zasięgu opracowano wiele programów obliczeniowych bazujących na teoriach matematycznych i pomiarowych przypomnianych w poprzednich podrozdziałach. Najczęściej opisywane i wzmiankowane w literaturze fotogrametrycznej programy użytkowe zostaną krótko scharakteryzowane.

Najczęściej stosowany i porównywany z nowo opracowanymi programami jest system ORIENT [Kager, Waldhausl, 1991]. ORIENT został opracowany w wiedeńskim Uniwersytecie Technicznym, jako system umożliwiający obliczanie różnych wariantów teratriangulacji na podstawie naziemnych zdjęć metrycznych i niemetrycznych. ORIENT zawiera programy służące do wykonywania podstawowych obliczeń fotogrametrycznych w tym także wyrównania na drodze

samokalibracji. Jako „obserwacje” mogą być wprowadzane współrzędne tłowe, współrzędne modelu, współrzędne geodezyjne; do wyrównania można dołączać także warunki parametryczne. ORIENT umożliwia przeprowadzenie większości obliczeń z jakimi można się spotkać w fotogrametrii: wcięcie w przód, budowę modelu, transformacje płaskie i przestrzenne. Model funkcjonalny wyrównania sieci zdjęć opiera się na warunku kolinearności a rozwiązywanie jest dokonywane algorytmem Cholesky’ego. W rozwiązaniu przez samokalibrację elementy orientacji wewnętrznej zdjęć oraz błędy obrazu mogą być wyznaczane oddzielnie dla każdego zdjęcia lub wspólnie dla grupy zdjęć. Można wybierać jeden z spośród kilku wielomianów aproksymujących błędy obrazu. Szeroką analizę porównawczą tego systemu zawiera [Tokarczyk, Mierzwa, 1994].

TERRANET [Nowak, Preuss, 1994] jest systemem rozwiązującym sieć zdjęć naziemnych. Algorytm bazuje na warunku kolinearności uzupełnionym dodatkowymi warunkami – na obserwacje geodezyjne (odległości, przyrosty współrzędnych, kąty poziome i pionowe). Zastosowano (znaną z aerotriangulacji) metodę niezależnych wiązek. Wszystkie obserwacje (geodezyjne i fotogrametryczne) są wagowane - na podstawie podanych a priori błędów średnich.

W obliczeniach sieci uczestniczą punkty wiążące, natomiast orientacja pojedynczego zdjęcia jest określana przez przestrzenne wcięcie wstecz na punkty osnowy – jest to etap wstępny do określenia przybliżonych parametrów poszczególnych zdjęć. Właściwy proces wyrównania można wykonywać wariantowo: dla zdjęć metrycznych uzmienniana jest tylko orientacja zewnętrzna. Można wprowadzać – jako niezmiennie – współrzędne środków rzutów.

Do wyrównania terrotriangulecji na zasadzie niezależnych zdjęć (wiązek) często jest stosowany aerofotogrametryczny program BINGO-F. Umożliwia on wyrównywanie bloków aerotriangulacji jak i terrotriangulacji, rozwiązywanych metodą niezależnych wiązek.

Pakiet programów pozwala na wyrównanie obserwacji geodezyjnych i fotogrametrycznych, aerotriangulację z uwzględnieniem środków rzutów, wyrównanie bloków zobrażeń zarejestrowanych satelitą SPOT. Zdjęcia zorientowane w BINGO mogą być użyte bezpośrednio w autografach analitycznych.

BINGO pozwala na:

- wyrównanie dużych bloków, np. 20000 zdjęć i 100000 punktów nawet na komputerach z 16MB pamięci RAM;
- obliczanie elips błędów;
- wyrównywanie sieci swobodnych (*ang. free network adjustment*).

Narzędzia BINGO-F pozwalają na transformacje 2D i 3D, graficzną reprezentację wyników na monitorze lub w postaci pliku HPGL, konwersje z systemów INTERGRAPH, ZEISS i ROLLEI.

Program jest dostępny na platformach MS-DOS, UNIX, VMS, Windows NT

W latach 1987-91 w Zakładzie Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH opracowano kilka programów samokalibracji SCAT (R. i A. Tokarczykowie). Programy te były jednak przygotowane do wyrównania tylko trzech zdjęć a każdy punkt musiał być pomierzony na każdym ze zdjęć.

Program TERTRIAN (W. Mierzwy) dokonuje równoczesnego wyrównania modeli z których złożona jest sieć terrofotogrametryczna. Współrzędne poszczególnych modeli, współrzędne punktów kontrolnych i środków rzutów, oraz przybliżone współrzędne punktów wiążących stanowią dane wejściowe. Znane muszą być elementy orientacji wewnętrznej, oraz – z dobrym przybliżeniem – elementy orientacji zewnętrznej. Korygowane są deformacje modeli. Obliczenia przebiegają iteracyjnie a ostatecznym wynikiem są wyrównane współrzędne punktów.

Analizy porównawcze programów SCAT i TERTRIAN zawiera [Tokarczyk, Mierzwa, 1994]. Polem doświadczalnym TERTRIAN-a były zabytkowe obiekty architektoniczne, oraz – mierzone cyklicznie - chłodnie Elektrowni „Bełchatów”.

Również na potrzeby pomiarów chłodni kominowych dr W. Mierzwa opracował programy MODSYM i CHLODNIA. MODSYM służy do pojedynczego wcięcia w przód, przy znajomości elementów orientacji wewnętrznej i zewnętrznej; na ogół należy zatem korygować nominalne wartości kątowych elementów orientacji w oparciu o punkty kontrolne. CHLODNIA pozwala obliczyć odchyłki projektowe powłoki chłodni hiperboloidalnej.

Do wielostanowiskowego określania odchyłeń od pionu a także poziomych składowych niewielkich przemieszczeń punktów, służy – opracowany według algorytmu metody różnicowej – program KOMIN (A. Tokarczyka). Danymi wejściowymi są elementy orientacji zdjęć, przybliżone współrzędne badanego punktu (lub komina), oraz pomierzone przyrosty współrzędnych tłowych.

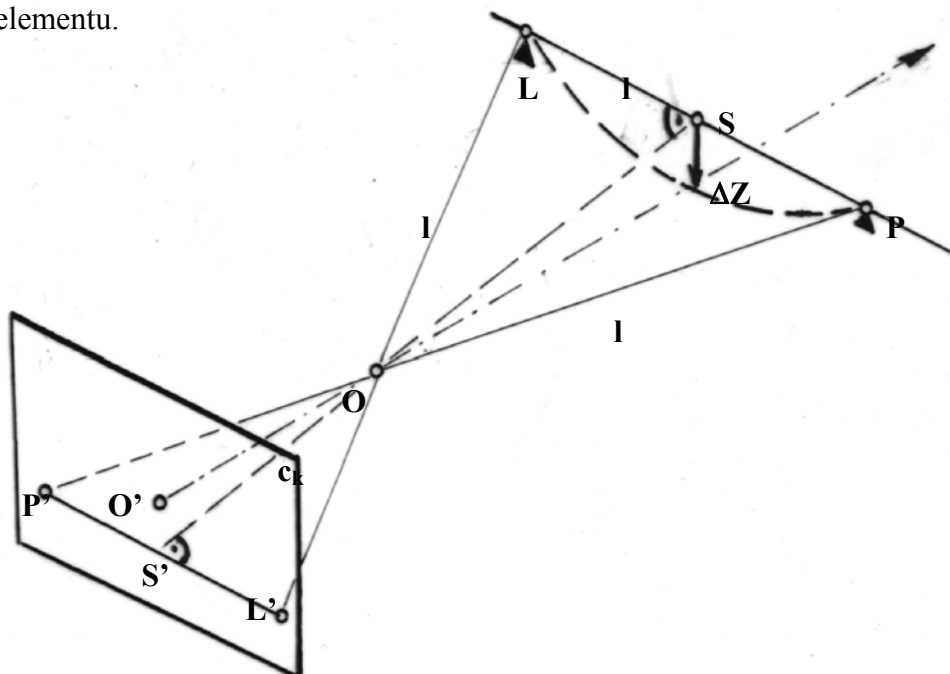
5. Metodyka pomiaru wybranych obiektów inżynierskich

Zagadnienia pomiarowe przy których rozwiązywaniu stosowane są metody fotogrametryczne, wymieniono w pierwszym rozdziale. W tym rozdziale zostaną natomiast omówione szczegółowo te zagadnienia, które ze względu na typowość, bądź jako szczególnie udane zastosowania fotogrametrii, znalazły się w programie zajęć laboratoryjnych z przedmiotu „fotogrametria inżynierska”.

5.1. Jednoobrazowa metoda pomiaru kształtu i badania odkształceń

5.1.1. Pomiary ugięć dźwigarów

Metoda fotogrametrii jednoobrazowej może być z powodzeniem stosowana do określania przemieszczeń płaskich (gdy jedna ze składowych wektora przemieszczeń jest równa 0), jak również do pomiaru odchyłeń punktów od położenia teoretycznego (np. od prostoliniowości, czy poziomości). Wymaga się jednak, aby płaszczyzna fotogramu była równoległa do płaszczyzny w której nastąpiły przemieszczenia, lub – w przypadku pomiaru odchyłeń – równoległa do płaszczyzny mierzonego elementu.



Rys.5.1. Jednoobrazowe określenie ugięcia (lub nieprostoliniowości) belki podpartej w punktach L i P

W celu wyznaczenia składowych ΔZ (i ewentualnie niewielkich ΔX), należy zorientować ramkę tłową spoziomowanej kamery równolegle do mierzonej belki. Dla sytuacji pokazanej na rysunku 5.1. można zatem zapisać warunek: $\Delta Y = 0$, lub $Y = \text{const}$; w praktyce wymagamy, aby ΔY było zanedbywalnie małe. Granice dopuszczalności składowych ΔY zależą od wielkości wykorzystanego kąta widzenia kamery [Bernasik, 1983].

Dla przypadku pokazanego na rys. 5.1 wartości składowych przemieszczenia oblicza się:

$$\Delta Z = \frac{Y}{c_k} \Delta z \quad \Delta X = \frac{Y}{c_k} \Delta x \quad /5.1/$$

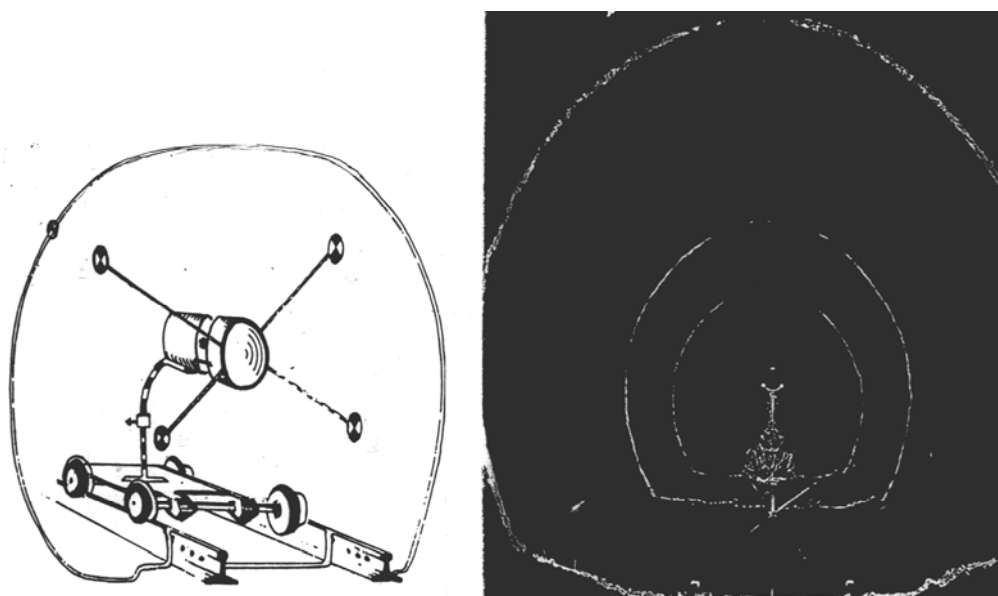
Do określania przemieszczeń zazwyczaj stosuje się metodę par czasowych - przyrosty współrzędnych tłowych (Δz , Δx) są mierzone jako paralaksy czasowe (q , p). Musi być ponadto spełniony warunek metody różnicowej – stałość elementów orientacji. Wpływ niezachowania – w trakcie okresowych

pomiarów przemieszczeń – tych samych kątów orientacji, można korygować w oparciu o stałe punkty (nie są potrzebne ich współrzędne terenowe !). Do korekcji niezachowania zwrotu (φ) czy nachylenia osi kamery (ω) wystarcza jeden punkt stały; do korekcji skręcenia – dwa punkty rozmieszczone na skrajach pola widzenia [Bernasik, 1983].

Opisany sposób bywa stosowany do pomiarów ugięć dźwigarów dachowych hal przemysłowych i przęseł mostów.

5.1.2. Pomiary przekroi podziemnych metodą płaszczyzny światła

Zasadę fotogrametrii jednoobrazowej stosuje się do pomiarów przekroi w wyrobiskach podziemnych (w pionowych szybach lub w korytarzach), przy wykorzystaniu urządzenia rzucającego na ocios „płaszczyznę światła” (rys. 5.2, 5.3). Silny snop światła rzuca zazwyczaj lampa błyskowa zamknięta w puszcze ze szczeliną, której płaszczyzna jest pozioma (szyb) lub pionowa (korytarz). Do tej płaszczyzny musi być równoległa – zgodnie z zasadą fotogrametrii jednoobrazowej – płaszczyzna ramki tłowej kamery.

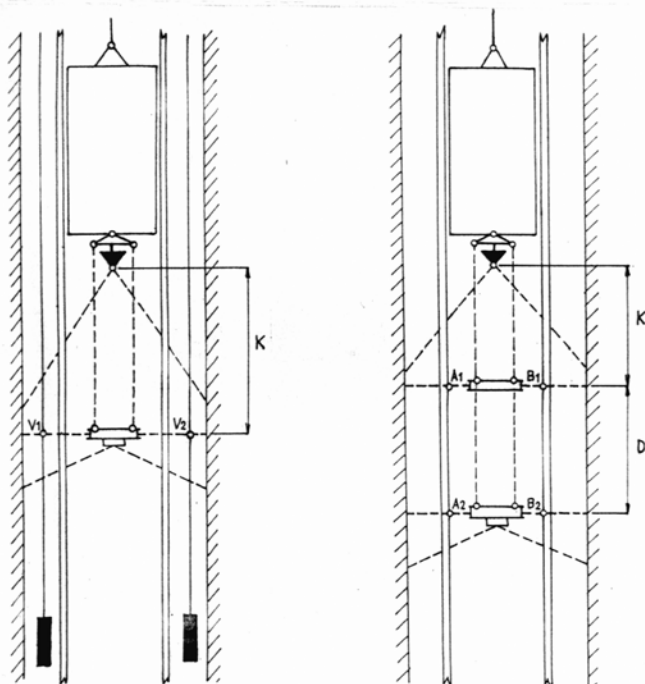


Rys.5.2. Rejestracja pionowego przekroju podziemnego korytarza metodą płaszczyzny światła; widoczne 4 sygnały stanowią podstawę rzutowego przekształcenia obrazu – wg. [Gutu, Tolea 1988]

W przypadku drażenia wyrobisk poziomych, tą drogą określa się skrajnię, wskazując miejsca ociosu w których należy usunąć materiał skalny. W tym celu doprowadza się obrazy do wybranej skali (w ciemni - powiększając lub przetwarzając fotomechanicznie) aby następnie zrysować kontur naświetlony „płaszczyzną światła”.

W przypadku szybów kopalnianych, czescy fotogrametrycy stosują do fotografowania adaptowaną kamerą lotniczą, rejestrując na zdjęciach nie tylko przekrój poziomy ociosu, ale także widoczne na zdjęciach prowadniki szybowe; druty zawieszonych pionów stanowią układ odniesienia (rys. 5.3). Precyzyjny pomiar fotogramów jest wykonywany na monokomparatorze Ascorecord, zaś obliczenia szukanych odchyłek od położenia normatywnego (kołowość przekroju, pionowość rury szybowej i poprawne ustawienie prowadników klatki szybowej) i pozwala opracować graficznie (rys. 5.4) specjalny program.

Idea pomiaru przekroji podziemnych przy zastosowaniu „płaszczyzny światła” da się efektywnie (i efektywnie) rozwinąć przy zastosowaniu fotogrametrii cyfrowej. Rejestracja cyfrową kamerą pracującą on line z odpowiednio oprogramowanym note-bookiem (ImageStation, VSD) umożliwi określanie odchyłek projektowych – pomiędzy projektową skrajnią – wizualizowaną jako „warstwa tematyczna” VSD a obrazem wydrążonego przekroju tunelu (czy wyrobiska). Dalszym rozwinięciem tej koncepcji może być rejestracja kamerą video – z jadącego „pociągu”: w trakcie ciągłej rejestracji przekroji wyrobiska cyfrową kamerą video, system śledzący będzie informować o miejscach występowania i rozmiarach odchyłek projektowych, zaś siedzący przy laptopie operator będzie informować o tym budowniczych.



Rys.5.3. Rejestracja przekroju rury szybowej metodą płaszczyzny światła; na rysunkach widoczne są prowadniki klatki szybowej, zawieszane pionowo i ocios, oraz podwieszona kamera; na rysunku lewym oświetlany jest tylko jeden przekrój, na prawym – dwa równocześnie – wg. [Gavlovsky, 1999]

5.1.3. Cyfrowa technologia pomiaru przekrojów podziemnych.¹

Opisana metodyka rejestracji i przetwarzania obrazów przekroji podziemnego wyrobiska (przy wykorzystaniu „płaszczyzny światła”) stwarza nową jakość przy zastosowaniu fotogrametrii cyfrowej. Powyżej opisane metody pomiaru przekrojów podziemnych dawały zadawalające wyniki, jednak wiązały się z długotrwałymi pracami kameralnymi. Rejestracja kamerą cyfrową i cyfrowe przekształcenie obrazu nie tylko upraszcza i skraca procedury pomiarowe, ale i otwiera szereg nowych możliwości.

Rejestrację kamerą cyfrową można wykonywać w pełni automatycznie, lub wprowadzając własne parametry fotografowania. Ze względu na specyficzne warunki – zdjęcie wykonuje się w ciemności a jedynym źródłem światła jest żarówka zamknięta w metalowej puszcze - ze szczeliną, wskazane jest stosowanie kilkusekundowego czasu naświetlania.

¹ Opracowano na podstawie: J. Bernasik, M. Ziajka: „Pomiary przekroji wyrobisk podziemnych metodami fotogrametrii cyfrowej” (oddane do druku w „Zeszytach Naukowych AGH, s. Geodezja”. Kraków 2004)



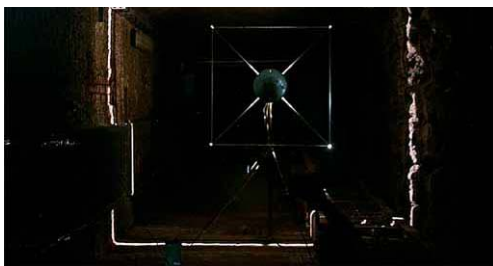
Rys. 5.4. Urządzenie rzucające na ocios „płaszczyznę światła” opracowane w Zakładzie Fotogrametrii AGH (projekt: J. Bernasik, wykonanie: Z. Starek): w okrągłej puszcze umieszczona jest silna żarówka, której światło rzucane przez szczelinę jest widoczne jako przekrój pionowy na ociosie wyrobiska. Cztery sygnaliki stanowią podstawę rzutowego przetworzenia sfotografowanego obrazu. Libelka pudełkow celownik umożliwiają odpowiednie zlokalizowanie i zorientowanie przekroju świetlnego.

Próby pomiarowe przeprowadzono w kopalni doświadczalnej AGH w Krakowie. Urządzenie, które rzuca na ocios płaszczyznę światła przedstawiono na rys. 5.4. Widoczna na zdjęciu ramka ma znane długości ramion, a tym samym określone współrzędne czterech wierzchołków w przyjętym układzie odniesienia. Zamontowana przy stojaku libelka umożliwia ustawienie urządzenia w pionie i zcentrowanie nad wybranym punktem, zaś celownik przeziernikowy umożliwia poprawne zorientowanie kamery względem osi wyrobiska.

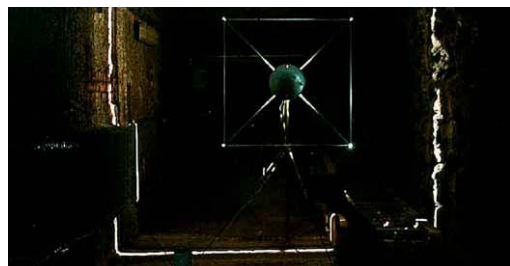
Zdjęcia rejestrowano przy użyciu kamery cyfrowej KODAK DCS260. Światłoczuła matryca CCD gwarantuje maksymalną rozdzielczość rzędu 1536 x 1024 pikseli. Zastosowany obiektyw daje możliwość zmiany ogniskowej (w zakresie 38mm – 115mm). Aparat rejestruje zdjęcia w formacie JPEG.

Urządzenie oraz kamerę ustawiano w osi chodnika kopalnianego. Zdjęcia nie miały znanych elementów orientacji wewnętrznej i zewnętrznej. Tak zarejestrowany obraz (rys.5.5a.) nie spełnia warunków geometrycznych fotogrametrii jednoobrazowej, więc należało go przetworzyć rzutowo, w oparciu o znane współrzędne naroży ramki, wyraźnie odfotografowane na zdjęciu. Do tego celu wykorzystano program MicroStation, a dokładnie jego nakładkę – IrasC (funkcja *Image to Map*) (rys.5.6).

a)



b)

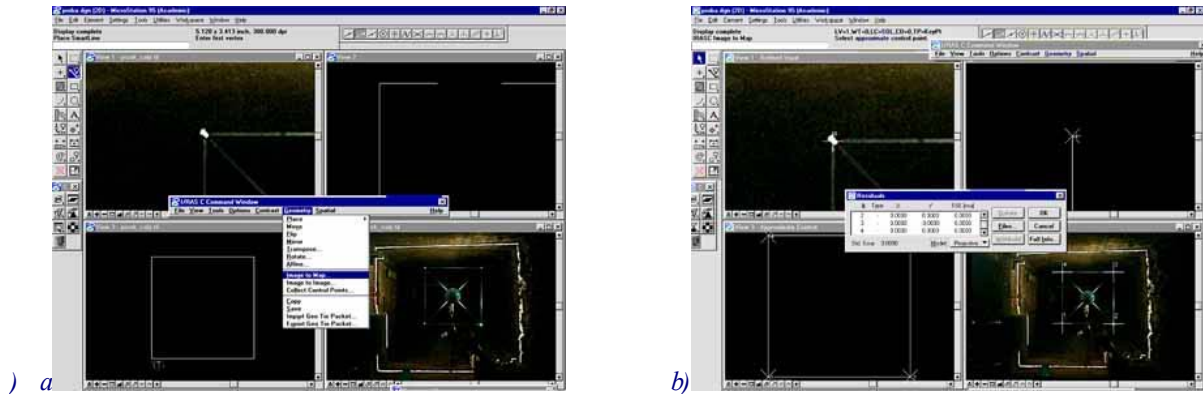


Rys. 5.5. Rejestracja pionowego przekroju podziemnego korytarza metodą płaszczyzny światła: a) obraz oryginalny - widoczne 4 sygnaliki stanowią podstawę rzutowego przekształcenia obrazu, b) obraz po przekształceniu rzutowym

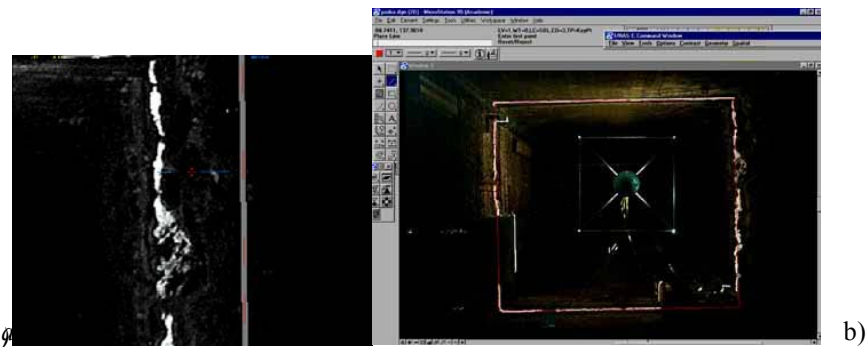
Na tak przygotowanym zdjęciu (rys.5.5.b.) można było wykonać pomiary przekroju poprzecznego chodnika; zdjęcia mierzono na autografie cyfrowym VSD, co pozwoliło na uzyskanie współrzędnych

mierzonych punktów bezpośrednio w przyjętym układzie odniesienia. Innym rozwiązaniem jest (jeszcze w MicroStation) wektoryzacja profilu.

Wyniki mogą być prezentowane w postaci współrzędnych określonych punktów, bądź też w formie odchyłek od przekroju teoretycznego w mierzonych punktach (rys.5.7). Możliwy jest również bezpośredni wydruk w dowolnej skali z MicroStation, odfotografowanego rzeczywistego przekroju wraz z nałożonym jego teoretycznym kształtem, jak przykładowo pokazano na rys. 5.8.



Rys. 5.6. a), b) Transformacja rzutowa zdjęcia w MicroStation.



Rys. 5.7. Przykład pomiaru odchyłki przy wykorzystaniu VSD (linia czerwona – przekrój teoretyczny, linia niebieska – różnica między przekrojem teoretycznych a pomierzonym) – rys.a; na rys.b – wizualizacja teoretycznego przekroju wyrobiska na mierzonym zdjęciu (czerwoną linią)

Jak dowodzą przeprowadzone próbne pomiary [Trela, Stój 2003], porównanie opisaney metodyki z geodezyjną metodą pomiaru podziemnego tunelu (wykorzystano tachimetr elektroniczny), dowodzi porównywalnej dokładności, przy znaczącym zmniejszeniu pracochłonności.



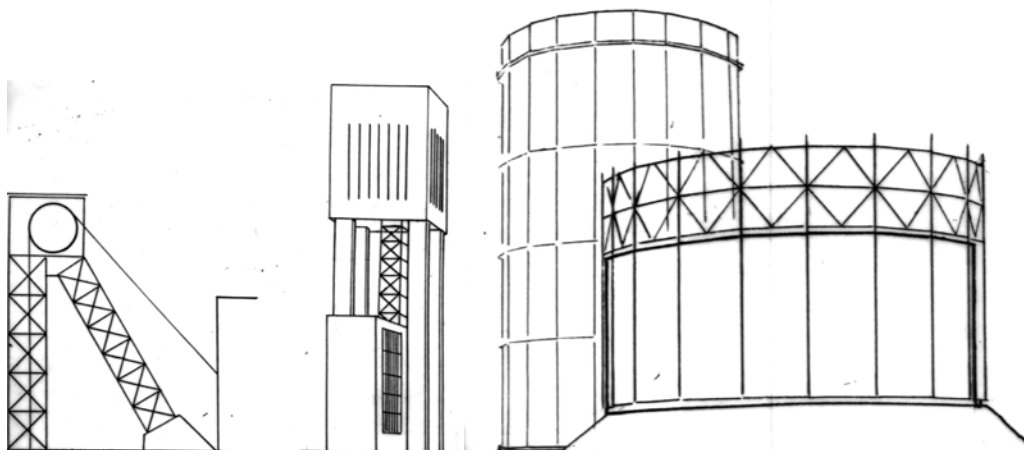
Rys. 5.8. Wektoryzacja przekroju podziemnego tunelu (wg. Trela, Stój, 2003]; widoczny jest czteropunktowy szablon i osoba trzymająca urządzenie w trakcie rejestracji.

Idea pomiaru przekroji podziemnych przy zastosowaniu „płaszczyzny światła” da się w przyszłości efektywnie (i efektywnie) rozwinąć. Rejestracja cyfrową kamerą współpracującą on-line z odpowiednio oprogramowanym note-bookiem (MicroStation, VSD) umożliwi określanie odchyłek projektowych – pomiędzy projektową skrajnią – wizualizowaną jako „warstwa tematyczna” VSD a obrazem wydrążonego przekroju tunelu (czy wyrobiska). Dalszym rozwinięciem tej koncepcji może być rejestracja cyfrową kamerą video – z jadącego „pociągu”: w trakcie ciągłej rejestracji przekroji wyrobiska, system śledzący będzie informować o miejscach występowania i rozmiarach odchyłek projektowych, zaś siedzący przy laptopie operator będzie informować o tym budowniczych.

5.2. Pomiar wychyleń i badania odkształceń wysmukłych budowli

Natura błędów fotogrametrii naziemnej szczególnie uzasadnia częste jej stosowanie do badania wychyleń od pionu wysmukłych budowli (kominów, masztów, wież, słupów). Zagrożenia stateczności tych obiektów są związane nie tylko z ich szczególnym kształtem (stąd pomiary odchyłek od pionowości, ale przede wszystkim ze stanem technicznym, warunkami eksploatacji, czasem z błędami projektowania i budowy, czy nieprzewidzianymi przyczynami losowymi. Zmiany kształtu w czasie określa się na podstawie obserwacji ponawianych w odstępach czasu, najlepiej z tych samych stanowisk. Przydatna jest wtedy fotogrametryczna metoda par czasowych (pseudoparalaks).

Czytelnik następných rozdziałów – rozpatrujących szczegółowo zagadnienia pomiaru kominów i wieżwiertniczych – powinien mieć świadomość, że analogiczne procedury (nawet nieco uproszczone) mogą być stosowane w trakcie pomiaru słupów wspierających suwnice mostowe, hale przemysłowe, słupów kopalnianych, wież wyciągowych, czy słupów-przewodników wysokich zbiorników gazu (rys. 5.9).

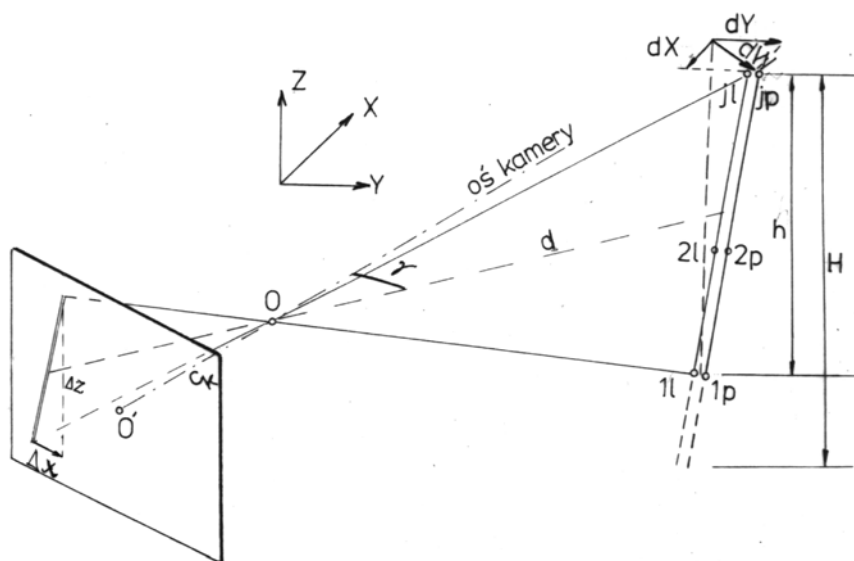


Rys. 5.9. Kopalniane wieże wyciągowe: z lewej – wieża „zastrażalowa”, z prawej – „maszynowa” oraz zbiorniki gazu: na pierwszym planie – teleskopowy „mokry”, za nim – zbiornik tłokowy („suchy”); pionowość widocznych słupów musi być kontrolowana.

5.2.1. Wykonywanie zdjęć i ich pomiar

Pomiary kształtu kominów, wież, czy masztów, mają zazwyczaj na celu określenie odchyłek osi budowli od pionu. Hipotetyczną oś obiektu - linię łączącą środki przekroji na obserwowanych poziomach - określa się na podstawie obserwacji charakterystycznych punktów konturu, czy elementów konstrukcyjnych.

Najczęściej wykonuje się zdjęcia z dwóch lub trzech stanowisk stwarzających optymalnie warunki wcięcia w przód. Kamera pomiarowa powinna być zrektyfikowana i starannie spoziomowana; w przeciwnym wypadku niezbędne są punkty kontrolne – np. „sztuczny horyzont” opisany w podrozdziale 2.3. Osnowę polową mierzy się z dokładnością pozwalającą ustalić odległości od obiektu z błędem względnym rzędu 1/5000. Ze względu na wpływ nasłonecznienia (deformującego komin), należy preferować dni pochmurne, zaś czas wykonania zdjęć skracać do minimum.



Rys.5.10. Pomiar wychylenia od pionu na zdjęciu fotogrametrycznym w przekrojach: 1, 2 ...j

Na każdym ze zdjęć mierzy się wychylenie trzonu obiektu od pionu w wymaganej liczbie przekroi (rys. 5.10). Fotogramy zestrzaja się w stereokomparatorze doprowadzając odpowiednią łącznicę znaczków tłowych do równoległości względem prowadnicy stereokomparatora. Rejestruje się współrzędne znaczków tłowych. Mierzy się współrzędne tłowe charakterystycznych punktów mierzonej budowli, obierając je parami po obu stronach konstrukcji, na tej samej wysokości. Liczbę i miejsca przekroi określają normy lub (częściej) zleceńodawca. Perspektywiczne odwzorowanie komplikuje czasem takie odszukanie par punktów, bo położone na tej samej wysokości punkty mogą mieć różne współrzędne „z”. Korzysta się wtedy z informacji obrazowych, takich jak poziome obręcze, malowane pasy, lub ślady betonowań. Gdyby to było niemożliwe, to korzysta się z zależności /5.2/.

$$\frac{z_l}{z_p} = \frac{\cos \gamma_p}{\cos \gamma_l} \quad /5.2/$$

Jest to wzór słuszny dla zdjęć poziomych – wg rys. 5.10.

Dąży się do tego, aby ze wszystkich stanowisk obserwować te same przekroje poziome. Wysokości obserwowanych poziomów, przyjęte na jednym ze stanowisk (nr. 1), można odszukać na zdjęciu wykonanym z innego (nr. n) licząc pomosty, obręcze, malowane pasy itp., lub korzystając z zależności 5.3 (słusznej dla zdjęć poziomych):

$$\Delta z_n = \Delta z_l \frac{d_l \cos \gamma_l c_{kn}}{d_n \cos \gamma_n c_{kl}} \quad /5.3/$$

gdzie:

Δz - różnice współrzędnych tłowych, d – odległości, c_{kl} , c_{kn} – stałe kamer na stanowiskach 1 ...n .

5.2.2. Obliczenia wychyleń i prezentacje wyników pomiaru

Geodeta - obliczając składowe wychylenia na podstawie pomierzonych kątów poziomych (metodą dwusiecznych), jako „obserwację” traktuje wartość kąta różnicowego (wg. rys.5.10):

$$\Delta \gamma = (\gamma_{jl} + \gamma_{jp} - \gamma_{ll} - \gamma_{lp}) 0,5 \quad /5.4/$$

Podobnie możemy wykonać obliczenia, licząc kąty poziome na podstawie współrzędnych tłowych „x”:

$$\gamma = \arctg \frac{x}{c_k} \quad /5.5/$$

Jest to postępowanie ściśle; wygodniejsze jest jednak obliczanie „różnicowe”:

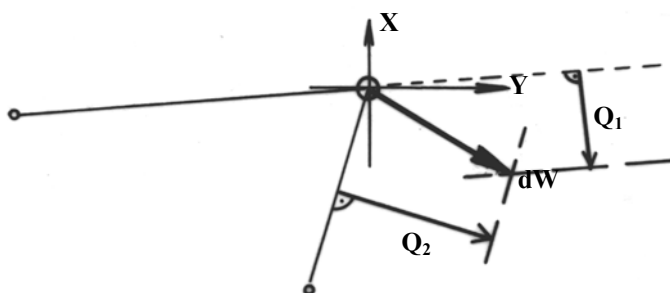
$$\Delta x \cong (x'_{jl} + x'_{jp} - x'_{ll} - x'_{lp}) 0,5 + \frac{\sin 2\gamma}{8 c_k} (\Delta x_l^2 - \Delta x_j^2) \quad /5.6/$$

W tym wzorze x' oznacza odczyt skali stereokomparatora (niezredukowany do punktu głównego), kąt γ określa się jako przybliżony dla całej budowli, Δx – szerokość komina na zdjęciu, na porównywanych poziomach. Łatwo jest zauważyć, że drugi człon wzoru przyjmuje wartość zerową jeśli obiekt jest sfotografowany w środku zdjęcia ($\gamma = 0$), lub gdy obiekt jest walcem albo graniastosłupem ($\Delta x_l = \Delta x_j$).

Dalsze obliczenia (składowych wychyleń dX i dY) można przeprowadzić według wzorów metody różnicowej [4.9]. Obliczenia te automatyzuje program KOMIN (A.Tokarczyka). Na ścisłym algorytmie oparty jest program DEFORM [K.Sobolewska, G. Iwan].

Obliczenia warto jest z grubsza skontrolować metodą graficzno - rachunkową (Langa). W tym celu nanosimy ze współrzędnych położenie stanowisk i obiektu, po czym odkładamy i wkreślamy równoległe składowe $Q = (\Delta x : d) : c_k$ - dodatnie w prawo, ujemne w lewo (rys.5.11). Punkt przecięcia tych linii wyznacza koniec wektora wychYLENIA wypadkowego dW i składowe dX , dY , które powinny potwierdzić wyniki obliczeń.

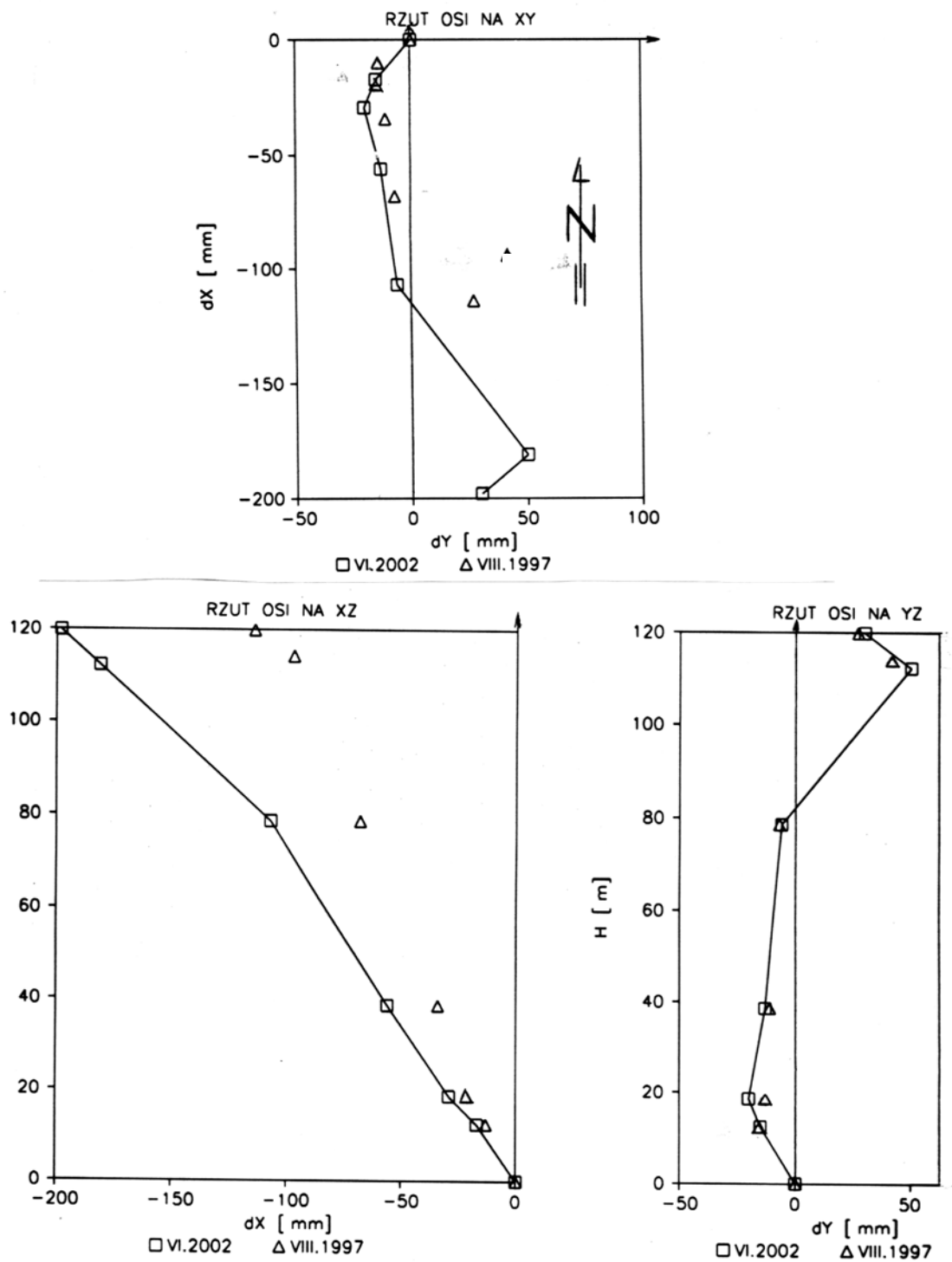
Graficzna prezentacja wyników pomiaru (rys.5.7) ułatwia ich interpretację przez zleceniodawcę, czy rzeczoznawcę budowlanego. Powinno się zatem przedstawić oś wychylonej budowli w rzutach na płaszczyzny: XY , XZ i YZ , ewentualnie również na pionową płaszczyznę wektora wychYLENIA wypadkowego wierzchołka: ZdW .



Rys.5.11. Graficzno-rachunkowe wyznaczanie wektora wychYLENIA

Porównanie „średnic” na poszczególnych poziomach – określonych pomiarowo z poszczególnych stanowisk - pozwala wnioskować o „owalizacji” przekroju komina, określa się także – w razie potrzeby – odstępstwa „tworzących” od prostoliniowości. W tych przypadkach niezbędna jest jednak podwyższona dokładność osnowy polowej.

Zarówno pomiar wychYLENIA, jak i bezpośredni pomiar okresowych zmian kształtu i wychYLENIA (metodą pseudoparalaks) można przeprowadzić z podobną dokładnością w fotogrametrycznej stacji cyfrowej (np.w VSD), pod warunkiem odpowiednio rozdzielczego zeskanowania. Jest to sposób wygodniejszy i szybszy od „stereokomparatorowego” i łatwy do opanowania przez niewprawną osobę.



Rys. 5.12. Wykresy wychYLENIA OSI KOMINA w rzutach na płaszczyzny: XY, XZ i YZ w dwóch stanach: lipiec 1997 i czerwiec 2002

5.2.3. Pomiary odchyleń od pionowości z użyciem kamery niemetrycznej

Stosując do pomiarów odchyleń od pionowości niemetryczną kamerę cyfrową musimy liczyć się z oczywistymi komplikacjami, ale z drugiej strony – możemy uzyskać pewne korzyści, wynikające

ze skrócenia procedur pomiarowych i uproszczenia obliczeń. Po zamocowaniu kamery w urządzeniu posiadającym 2 libelle i lunetę orientującą, wykonujemy 2 zdjęcia "przeciwnie", co pozwala wyznaczyć poprawki rektyfikacyjne w sposób opisany w rozdziale 2.3.3.

Całość prac pomiarowych związanych z obiektem pomiaru obejmuje:

- 1) wykonanie zdjęć mierzonej budowli,
- 2) pomiar współrzędnych tłowych punktów pomiarowych obiektu,
- 3) transformację przez obrót (wg. wzoru 2.12) przestrzennych współrzędnych tłowych wszystkich punktów pomiarowych,
- 4) obliczenie współrzędnych ekwiwalentnych punktów mierzonego obiektu,
- 5) wyznaczenie wielkości stanowiących cel pomiaru (współrzędne terenowe, odchylenia od postaci teoretycznej, przemieszczenia, odkształcenia itp.).

Ad 1. Zdjęcia wykonujemy z co najmniej 2 stanowisk, określając lokalne współrzędne stanowisk i obiektu.

Ad. 2. Mierzymy współrzędne pikselowe punktów obranych w sposób objaśniony na rys. 5.10 – na przykład w VSD. Jeżeli chcemy uzyskać wyniki pomiaru obiektu w czasie „prawie rzeczywistym”, to możliwa jest automatyzacja procesu wyznaczania poprawek rektyfikacyjnych².

Ad 3. Uwzględniając wyznaczone poprawki rektyfikacyjne wykonujemy transformację współrzędnych tłowych ,

Ad 4. Obliczamy współrzędne ekwiwalentne, przyjmując jako y_i odległość stanowiska od budowli (wg. wzorów 4.4),

Ad 5. Jako obserwacje traktujemy różnice współrzędnych ekwiwalentnych określające wychylenie między poziomem górnym – j i dolnym – l (zmierzone na zdjęciu wykonanym na stanowisku 'i'):

$$\Delta X_{ij} = X_{ej} - X_{el} \quad ,$$

$$\text{lub: } \Delta X_{ij} = X_{e1l} + X_{e1j} - X_{e1l} - X_{e1j} \quad /5.7/$$

aby ostateczne wartości składowych wychylenia obliczyć z równań obserwacyjnych:

$$A_i dX - B_i dY - \Delta X_{ij} = v$$

A_i oraz B_i obliczamy wg. znanych wzorów (4.12)

5.2.4. Uwagi i informacje uzupełniające o pomiarach kominów przemysłowych

Sposób przeprowadzenia prac związanych z wykonaniem zdjęć pomiarowych (polowych i laboratoryjnych) rzutuje nieodwracalnie na ostateczne efekty pomiaru – dokładnościowe jak i ekonomiczne. Z tych względów warto zasugerować - zwłaszcza początkującym:

- bardzo staranne projektowanie pomiaru z jak najwcześniejszą kontrolą dobrej widoczności wszystkich elementów budowli przewidzianych do pomiaru, z uwzględnieniem sposobu pomiaru osnowy, dowiązania i orientacji lokalnej sieci pomiarowej,
- rezygnację z odszukiwania dokumentacji i punktów istniejącej osnowy pomiarowej - sieć lokalną można orientować względem elementów, czy obiektów ważnych z punktu widzenia eksploatacji mierzonego urządzenia obiektów - związanych z nim funkcjonalnie – np. zgodnie z osią czopucha kominu (oczywiście wskazując kierunek północy),
- w przypadku braku planu sytuacyjnego, należy wykonać własny szkic z pomiarami do najważniejszych sąsiednich obiektów,

² J. Bernasik, S. Mikrut: Automatyzacja wyznaczania poprawek rektyfikacyjnych niometrycznej kamery cyfrowej. Sympozjum PTFiT. Kraków, Dobczyce 2007

- w trudnych warunkach (ciasna zabudowa, wysokie kominy) najkorzystniejsze są wysokie stanowiska (dachy, pomosty, wieże oświetleniowe itp.),
- nie należy stosować ekstrapolacji jako sposobu określania prawdopodobnego wychylenia nie sfotografowanej dolnej partii - należy obrać dodatkowe stanowiska i uzupełnić pomiar geodezyjnie,
- do określenia skali mikrosieci pomiarowej najlepiej jest stosować rozwinięcie bazowe, lub bezpośredni pomiar jednej długiej bazy prostym dalmierzem (unikając raczej poligonizacji),
- przydatna jest wiedza, że wysokość segmentu betonowania komina wynosi 2,5 metra,
- szczegółowy zakres pomiaru najlepiej jest uzgadniać na miejscu z opracowującym ekspertyzę budowlaną (przy okazji można uzgodnić formę opracowania),
- stabilizacja stanowisk na ogół jest zbędna,
- należy zapisywać: prędkość i kierunek wiatru (mierząc je na wysokim stanowisku), datę i godziny pomiaru, warunki meteorologiczne (temperaturę, nasłonecznienie, deszcz - zwłaszcza padający bezpośrednio przed pomiarem).

Realia ekonomiczne zmuszają do minimalizowania kosztów przeprowadzenia pomiarów, przez racjonalną organizację pracy (oczywiście bez obniżania jakości). W przypadku zespołowego wyjazdu do odległej miejscowości, każdy dodatkowy pracownik i dodatkowy dzień pobytu, to znaczące obciążenie finansowe, dlatego wykonawca zdjęć (czy geodeta - obserwator) zazwyczaj może zrezygnować ze stałej pomocy pomiarowego wykorzystując czyjąś pomoc dorywczo - np. przy niezbędnym pomiarze taśmą, czy wciągnięciu sprzętu na wysokie stanowiska.

Zakres pomiarów kominów żelbetonowych jak i murowanych obejmuje często badanie osiadań fundamentu, lokalizację i dokumentację fotograficzną uszkodzeń, zaś termowizyjnie określa się układ pól termalnych płaszcza komina. Specjalistyczne badania obejmują: sklerometryczne lub udarowe pomiary wytrzymałości betonu, laboratoryjne badania pobranych próbek betonu i zbrojenia (lub muru ceglanego), oraz wykładziny wewnętrznej. Ocenia się i fotograficznie dokumentuje stan płaszcza, jak i wnętrza komina. Szczegółowy zakres badań określają normy. Stosując metody fotogrametryczne czy teledetekcyjne (termowizja) można uzyskać znaczną część niezbędnych informacji diagnostycznych.

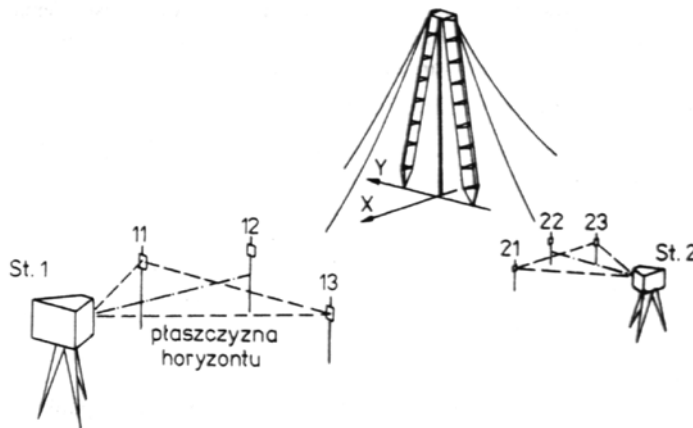
Badania i pomiary kominów stalowych stanowią podstawę ekspertyz, określających ich stan techniczny. Poza pomiarami kształtu i wychylenia wykonuje się nieniszczące pomiary grubości ścianki trzonu. Grubość ścianki komina określa się metodą ultradźwiękową, natomiast defektoskopowe badania metodą magnetyczno-proszkową stanowią podstawę oceny zmęczeniowego zużycia konstrukcji. Wyniki tych badań stanowią podstawę statyczno-wytrzymałościowej analizy, prognozującej okres bezpiecznej eksploatacji.

Opisany w poprzednim podrozdziale graficzno-rachunkowy sposób określania wychylenia może być bardzo przydatny, gdy znajdzie potrzeba teodolitowego sterowania pionowaniem stalowego komina, przez korekcję sił naciągu 3 lin odciągowych. Potrzeba taka pojawia się na przykład po wymianie lin. Uwzględniając usytuowanie komina, stanowisk teodolitów i punktów zakotwienia lin, oraz kąty nachylenia lin i skok śruby naciągającej (rzymskiej), można przygotować odpowiednie schematy graficzno-rachunkowe. Po zmierzeniu kątów różnicowych charakteryzujących wychylenie, z pomocą kalkulatora, można szybko określać aktualne wychylenie, oraz wielkości zmian długości lin (przez odpowiednie obroty śrub naciągowych) [Bernasik, Ładecki, 2004].

5.2.5. Badania odkształceń wież wiertniczych w trakcie próbnych obciążeń

Wieża wiertnicza stanowi element urządzenia wiertniczego. Konstrukcja i stan wieży wiertniczej decydują o jej udźwigu a zatem również o dopuszczalnej głębokości wiercenia. Podstawowym warunkiem bezawaryjnej eksploatacji wieży jest prawidłowy rozkład naprężeń w jej elementach. Do najważniejszych informacji, na których opiera się diagnozy techniczne, należą rozmiary i rodzaj

odkształceń wywołanych próbnymi obciążeniami (sprężyste, czy plastyczne). Najwłaściwszą metodą określania przemieszczeń węzłów konstrukcyjnych wieży jest metoda fotogrametryczna. opartą o trzy stałe punkty kontrolne 11, 12, 13 (lub 21, 22, 23)



Rys. 5.13. Fotogrametryczny pomiar przemieszczeń bezwzględnych z korekcją elementów kątowych opartą o trzy stałe punkty kontrolne 11, 12, 13 (lub 21, 22, 23)

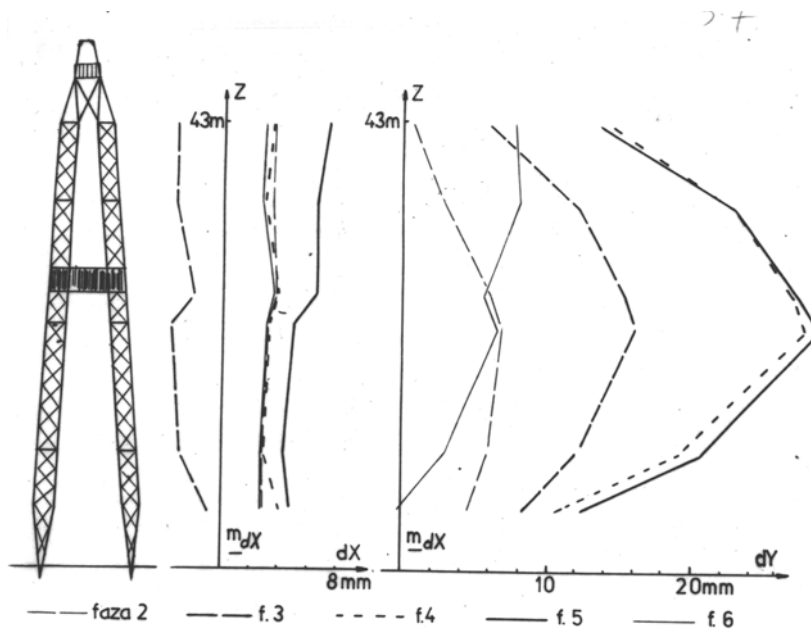
Wypracowana metodyka pomiarowa [Bernasik J., Tokarczyk A. 1991] zakłada, że po ustawieniu dwóch kamer pomiarowych, sygnalizuje się przed każdą z nich po trzy stałe punkty kontrolne (bez konieczności pomiaru ich współrzędnych terenowych): dwa na skrajach pola widzenia (najlepiej blisko horyzontu kamery), zaś trzeci w pobliżu osi kamery (rys.5.13). Fotografuje się maszt wiertniczy równocześnie z dwóch stanowisk w kolejnych fazach obciążenia - porównuje się stany: przed obciążeniem, po obciążeniu (pośrednie i maksymalne) i po odciążeniu. Po właściwym zorientowaniu kamer, synchronicznie wykonuje się zdjęcia. Stanowiska powinny być tak obrane, aby wszystkie przewidziane do pomiaru węzły konstrukcyjne wieży były widoczne na zdjęciach (także po opuszczeniu przewodu wiertniczego). Przez cały czas próby wytrzymałościowej, kamery nie mogą być poruszone; wpływ niewielkich zmian orientacji kamer koryguje się w oparciu o stałe punkty kontrolne. Przybliżone współrzędne stanowisk kamer i wieży wiertniczej (czy nawet przewidzianych do pomiaru węzłów konstrukcyjnych) określa się w układzie związanym z konstrukcją (i obciążeniami) wieży wiertniczej.

Omawiane wcześniej pomiary deformacji dźwigara, czy odkształceń komina (w czasie) należą do kategorii pomiarów przemieszczeń względnych. Dlatego mogły tam występować „przybliżone” odległości czy kąty orientacji. W odróżnieniu od nich, pomiary przemieszczeń bezwzględnych (punktów kontrolowanych czy całych obiektów) wymagają – w przypadku pomiarów ponawianych okresowo z tych samych stanowisk – znajomości zmian elementów orientacji zdjęć. Dokładnie określa się zatem zmiany $\Delta X_{st.}$, $\Delta Y_{st.}$, $\Delta Z_{st.}$, $\Delta \varphi$, $\Delta \kappa$, $\Delta \omega$. Składowe przemieszczenia stanowiska najlepiej jest określać geodezyjnie, natomiast przykładowy (i uproszczony) sposób korekcji zmian elementów kątowych zostanie omówiony w odniesieniu do badania odkształceń wieży wiertniczej w oparciu o rys. 5.13.

W stereokokomparatorze precyzyjnym najdokładniej mierzy się paralaksy czasowe. Pary czasowe zestawia się ze zdjęć poszczególnych stanów. Mierzy się paralaksy czasowe punktów kontrolnych: podłużną – punktu centralnego (12) i poprzeczną – punktów bocznych (11 i 13). Po pomiarzeniu paralaks podłużnych kontrolowanych punktów wieży i pomiarze ich współrzędnych tłowych (lewego zdjęcia), pomiar kończy powtórne odczytanie punktów kontrolnych.

Wartość paralaksy czasowej odczytanej na punkcie P (p'_p) koryguje się ze względu na błędy niezachowania stałości kątowych elementów orientacji zwrotu i skręcenia, na podstawie odczytów współrzędnych tłowych i paralaks czasowych kontrolnych punktów 11,12, 13, według wzorów /5.8/:

$$p_p = p_p' + \frac{q_{13}' - q_{11}'}{x_{13}' - x_{11}'} z_p - \frac{\cos^2 \gamma_{112}}{\cos^2 \gamma_p} \left(p_{12}' + \frac{q_{13}' - q_{11}'}{x_{13}' - x_{11}'} z_{12}' \right) \quad /5.8/$$



Rys. 5.14. Graficzna ilustracja wyników pomiaru odkształceń wieży wiertniczej (6 stanów)

Na podstawie skorygowanych paralaks czasowych oblicza się składowe wektorów przemieszczeń punktów. Obliczenia można wykonywać według wzorów metody różnicowej [4.9], albo można wykorzystać program KOMIN. Wyniki pomiaru przedstawia się graficznie w sposób opisany poprzednio (rys. 5.12).

Poza wyznaczaniem bezwzględnych przemieszczeń węzłów konstrukcyjnych wieży, często kontroluje się prawidłowość jej montażu. Badania stanu stalowych „świec” i ich spawanych połączeń są wykonywane w innym czasie i warunkach - zazwyczaj przed zmontowaniem wieży, w pozycji leżącej. Dokonuje się szczegółowych oględzin, ultradźwiękowo bada grubość ścianek stalowych rur, defektoskopowo wykrywa się wady połączeń spawanych, odrdzewia i zabezpiecza przed korozją.

Wartość fotogrametrycznych pomiarów wież wiertniczych uwypukla się w przypadku awarii, czy katastrof. Rejestracja stanu wcześniejszego pozwala określić odkształcenia, które z kolei stanowią ważny element ekspertyzy, określającej warunki dalszej eksploatacji. Stereofotogrametryczna dokumentacja katastrofy (rys. 5.15) może być przydatna przy określaniu jej przyczyn. Często pomiar kształtu i badania odkształceń wież uzupełnia się o badanie naprężeń lin odciągowych, które zostaną opisane w następnym podrozdziale.



Rys. 5.15. Jedno ze zdjęć stereofotogrametrycznej dokumentacji katastrofy wiertniczej

5.3. Określanie parametrów lin odciągowych

Zadaniem lin odciągowych jest zapewnienie stateczności masztów, wież wiertniczych czy stalowych kominów. Liny powinny być normatywnie naprężone a równowaga poziomych składowych sił naprężenia lin zaczepionych na poszczególnych poziomach jest oczywistym warunkiem ich prawidłowego funkcjonowania. Nieprawidłowe naprężenia lin bywają przyczynami katastrof. Do określania naprężeń lin – poza trudną technicznie metodą dynamometryczną – stosowane są metody: pośrednie: geodezyjna, fotogrametryczna; rzadziej rezonansowa, czy tensometryczna.

5.3.1. Fotogrametryczne określanie parametrów lin odciągowych

Metoda geodezyjna i fotogrametryczna są metodami pośrednimi, opartymi na obserwacji kształtu liny. Obie metody oparte są na wiedzy, że swobodnie zawieszona, ważka i elastyczna lina przyjmuje kształt *katenoidy* (rys. 5.16). Katenoide – w układzie x, z - określa równanie:

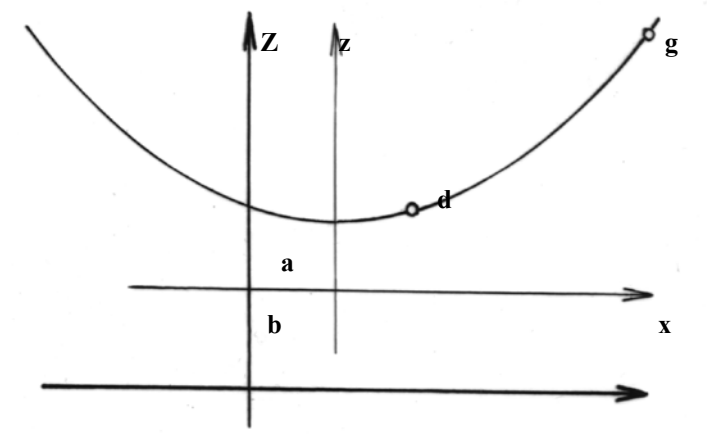
$$z = \frac{k}{2} (e^{\frac{x}{k}} + e^{-\frac{x}{k}}) \quad /5.9/$$

W celu wyznaczenia - występującego w równaniu - parametru k określa się (w terenowym układzie liny XZ) współrzędne co najmniej trzech punktów liny, które aproksymujemy zgodnie z wzorem:

$$Z - b = \frac{k}{2} (e^{\frac{X-a}{k}} + e^{-\frac{X-a}{k}}) = k \cosh \frac{X-a}{k} \quad /5.10/$$

gdzie:

- k – parametr krzywej łańcuchowej,
- a, b - składowe translacji układów współrzędnych.



Rys. 5.16. Katenoida i jej parametr (k)

Jak wynika ze wzoru (5.9), do wyznaczenia parametru k wystarczy znajomość współrzędnych X, Z trzech punktów liny. Można je określić na podstawie obserwacji geodezyjnych lub fotogrametrycznych. Fotogrametryczne badanie lin stwarza jednak lepsze warunki badania i korekcji naprężeń, bowiem wszystkie punkty badanych lin są rejestrowane w tym samym momencie (wraz z masztem).

Siły wywierane na linę w punktach jej zaczepienia są skierowane stycznie do katenoidy; wartości sił (i ich składowych) można określić na podstawie obserwacji kształtu liny (wyznaczając parametr k), znając ciężar jednostkowy liny q (ciężar 1 metra liny):

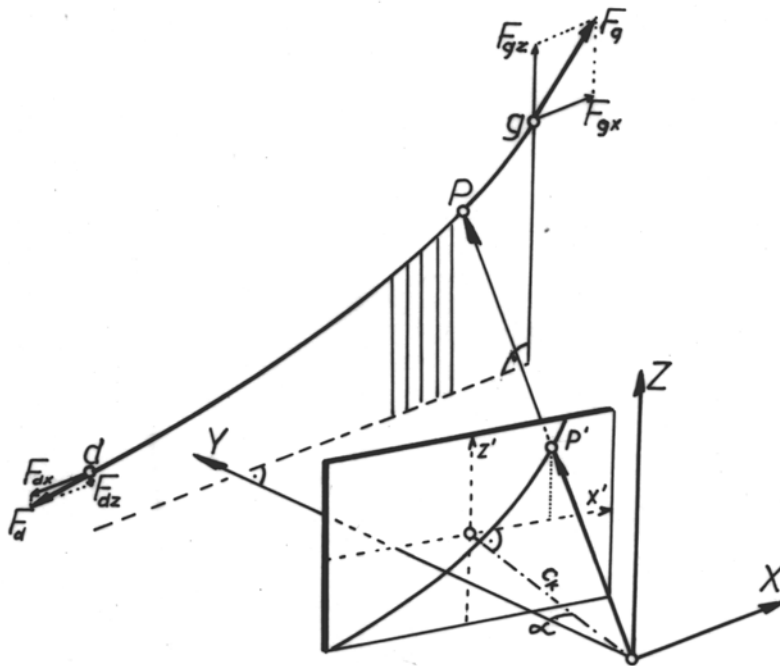
$$F_{dx} = F_{gx} = k q \quad /5.11/$$

$$F_{dz} = k q m_d \quad /5.12/$$

$$F_{gz} = k q m_g \quad /5.13/$$

gdzie m_d, m_g – współczynniki kierunkowe stycznej do liny w punktach d i g .

Poza parametrami fizycznymi, można określić miary liniowe: strzałkę zwisu, długość liny, odciętą punktu w którym lina osiąga największą strzałkę zwisu i inne.



Rys.5.17. Fotogrametryczne wyznaczenie parametrów linii odciągowej

Fotogrametryczne wyznaczenie współrzędnych X i Z punktów linii (występujących we wzorze /5.9/ objaśnia rys.5.17. Jeżeli pionowa klisza była zorientowana równoległe do linii, to współrzędne oblicza się:

$$X = \frac{Y}{c_k} x \quad Z = \frac{Y}{c_k} z \quad /5.14/$$

gdzie: x, z – współrzędne tłowe.

Jeżeli klisza – jak na rys. 5.17 – była zwrócona o kąt α (czy nachylona pod kątem ω), to dokonujemy transformacji przestrzennej, obliczając x_t, y_t, z_t według wzorów /4.1/; jeżeli $\omega = 0$, to transformujemy według prostszej zależności:

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ c_k \\ z \end{bmatrix} \quad /5.15/$$

po czym obliczamy:

$$X = \frac{Y}{y_t} x_t \quad Z = \frac{Y}{y_t} z_t \quad /5.16/$$

Jak wynika z podanych wzorów, fotogrametra musi w terenie określić współrzędne przestrzenne punktów zaczepienia linii w lokalnym układzie mającym początek w środku rzutów. Powinno się także ustalić kąt poziomy α - między osią kamery a normalną do linii: ze znakiem ujemnym, jeśli oś kamery jest zwrócona w prawo od normalnej do linii.

Pośrednie metody określania parametrów liny wolno stosować jedynie w odpowiednich warunkach pogodowych: bezwietrznie, stała temperatura, umiarkowane nasłonecznienie. Należy wykluczyć kołysanie masztu i ruch lin. Przewagę metody fotogrametrycznej (nad geodezyjną) można dostrzec w tym, że umożliwia optymalny przebieg pomiaru - wszystkie punkty liny są rejestrowane w tym samym momencie. Poza tym, na moment spełniający wymienione warunki wyczekuje się tylko raz (wykonanie zdjęcia), a nie przy pomiarze każdego punktu, co zmusza do ograniczenia liczby punktów mierzonych geodezyjnie.

5.3.2. Automatyzacja badania naprężeń lin na drodze analizy obrazów cyfrowych

Wadą pośrednich metod pomiarów lin jest rozciągnięcie w czasie procedury korekcyjnej. Jeżeli bowiem pomiar ma stwarzać możliwość korygowania błędów naprężenia lin, to wynik (naprężenia) i poprawki naprężenia powinno się określać szybko a najlepiej w czasie „prawie rzeczywistym”. Poprawki naprężenia powinny mówić o ile należy skrócić (lub wydłużyć) każdą z lin, aby przy normatywnych ich naprężeniach obiekt był pionowy. O ile procedura zautomatyzowanego określania poprawek korekcyjnych jest zadaniem mechaników, to zautomatyzowane określanie parametrów lin zostało rozwiązane przy wykorzystaniu fotogrametrii cyfrowej.

Automatyzacja opisanego zagadnienia pomiarowego była w latach 1999-2001 przedmiotem badań³ których efektem jest fotogrametryczny system pomiarowy pozwalający określać naprężenia lin w czasie prawie rzeczywistym.

Opracowany system umożliwia automatyczny pomiar kształtu lin odciągowych wysokich masztów i stalowych kominów a następnie - określenie sił naciągu lin. System działa w czasie prawie rzeczywistym, co oznacza, że w ciągu kilku minut od dokonania rejestracji można odczytać składowe siły wywieranych przez linę na punkty zaczepienia. Podstawowymi komponentami systemu są: kamera cyfrowa o wysokiej rozdzielczości, oprogramowanie systemu i komputer klasy *note-book*. Zastosowanie do rejestracji obiektu kamery cyfrowej sprzężonej z komputerem w trybie *on-line* umożliwia natychmiastowe komputerowe opracowanie zarejestrowanego obrazu cyfrowego. Oprogramowanie realizuje następujące zadania:

- przetworzenie obrazu cyfrowego do postaci najdogodniejszej dla pomiaru automatycznego,
- pomiar punktów dostosowania niezbędnych do transformacji współrzędnych obrazu cyfrowego do układu terenowego,
- automatyczny pomiar punktów obrazu liny z dokładnością pikselową,
- obliczenie współczynników transformacji rzutowej lub bezpośredniej transformacji rzutowej (*DLT*),
- przeliczenie współrzędnych punktów z układu obrazu liny na układ terenowy.
- aproksymację punktów liny krzywą łańcuchową,
- obliczenie składowych sił naciągu liny, oraz parametrów pozwalających na oszacowanie dokładności uzyskanych wyników.

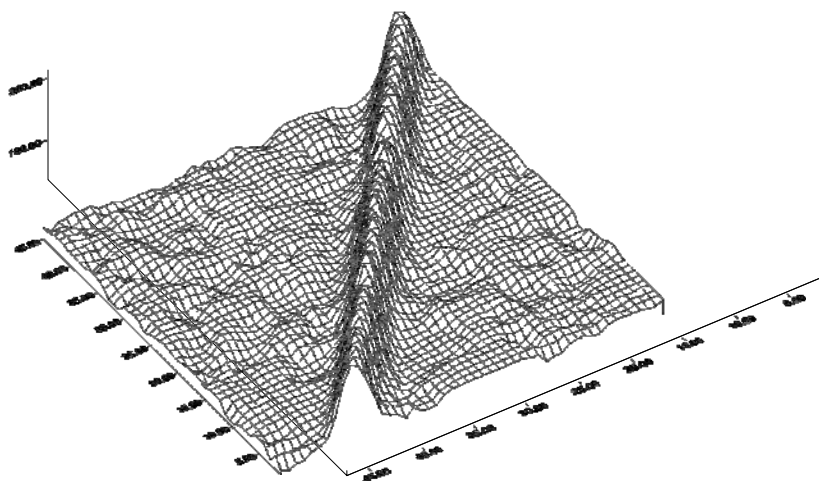
³ GRANT KBN; wykonawcy: J.Bernasik, W.Mierzwa, A.Boroń, J.Cieślak, S.Mikrut, R.Tokarczyk, L.Kolondra



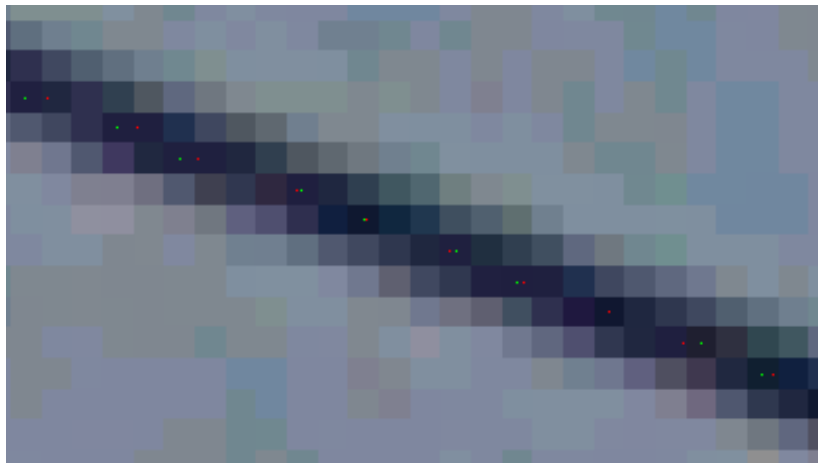
Rys. 5.18. Zarejestrowany kamerą cyfrową Kodak DCS 760 obraz linii wraz z punktami stanowiącymi podstawę przekształcenia rzutowego, którymi były: dwa punkty zaczepienia linii, trzeci – to sygnał na statywie, czwarty został zaznaczony na trzonie komina

Istotą algorytmu wykrywania linii na obrazie cyfrowym jest na aproksymacja obrazu linii funkcją odwrotną do paraboli. Sposób obliczania współczynników przekształcenia rzutowego płaszczyzny obrazu na płaszczyznę linii jest oparty na transformacji rzutowej płaskiej lub DLT. Porównanie wyników uzyskiwanych tą metodą z wynikami uzyskanych innymi sposobami pośrednimi (geodezyjnym i analogowo-cyfrowym) świadczy o pełnej poprawności działania systemu; czas dostarczenia wyników nie przekracza 5 minut.

Prace polowe mają na celu - przede wszystkim - pomiar współrzędnych X i Z co najmniej 4 punktów dostosowanych, obranych lub zasygnalizowanych w pionowej płaszczyźnie linii (rys. 5.18). Rejestracja wysokorozdzielczą kamerą cyfrową umożliwia dokonanie wstępnej analizy obrazu linii - zwizualizowanej na ekranie note-booka (rys. 5.20), zaś po uruchomieniu procedury automatycznego pomiaru i obliczeń - odczytanie wyznaczanych parametrów linii.



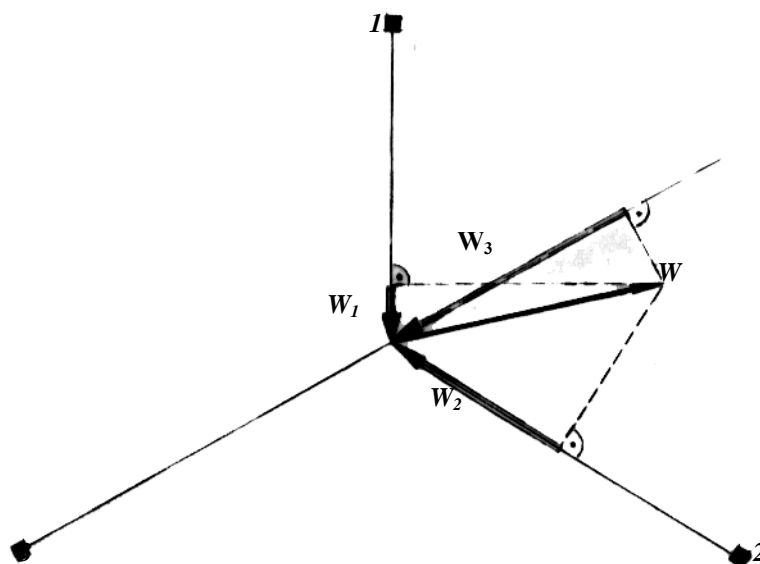
Rys. 5.19. Aksonometryczna interpretacja cyfrowego zapisu zarejestrowanej linii; na osi pionowej odłożono wartości pikseli



Rys.5.20. Obraz cyfrowy fragmentu liny; wskazane są piksele zaliczone do liny w trakcie wstępnej, automatycznej selekcji.

5.3.3. Pionowanie masztów i stalowych kominów poprzez zmianę długości lin odciągowych

Przywrócenie pionowości wychylonej stalowej konstrukcji zaopatrzonej w liny odciągowe (np. masztu, wieżomasztu wiertniczego, czy stalowego kominu), lub pionowe ustawienie nowo wzniesionej konstrukcji, jest możliwe poprzez zmianę długości cięgien. Niezbędne jest jednak zachowanie przy tym warunków natury mechanicznej, o których jest mowa w rozdziale w źródłowej publikacji⁴. Podstawowym pytaniem poniższych rozważań będzie: o jakie wielkości należy zmienić długości poszczególnych cięgien, aby doprowadzić konstrukcję do pionowo



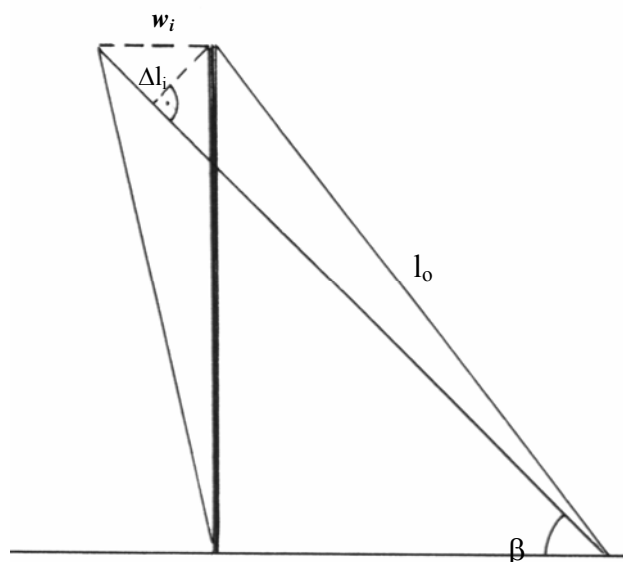
Rys. 5.21. Usytuowanie i numeracja punktów zakotwienia lin odciągowych (1, 2, 3), wektor wychylenia od pionu w , oraz wartości składowych przemieszczeń punktu zaczepienia lin – w

⁴ J. Bernasik, B. Ładecki: Rektyfikacja masztów i kominów stalowych z odciągami linowymi poprzez zmianę długości lin. Zeszyty Naukowe AGH. Mechanika. T. 23. Z. 4. Kraków 2004.

kierunkach lin odciągowych: w_1, w_2, w_3 ; strzałka skierowana w stronę masztu oznacza konieczność wydłużenia liny, zaś skierowana w stronę punktu zakotwienia – konieczność skrócenia liny.

Aby doprowadzić maszt do pionowości, należy zmienić odpowiednio długości poszczególnych lin o wielkości: $\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3$, obliczając je zgodnie z rysunkiem 5.22

$$\Delta l_i \cong l_i - l_o \cong w_i \cos \beta_i \quad /5.17/$$



Rys. 5.22. Zmiana długości cięgna - z pierwotnego l_o na wtórne $l = l_o + \Delta l$ - niezbędna do przemieszczenia punktu zaczepienia liny o w_i .

Jak zaznaczono na wstępie, opisanie postępowanie zakłada zachowanie pierwotnych naprężeń lin. Prace korekcyjne powinny być wykonywane pod nadzorem mechanika; ważne jest aby: rozpoczynać od poluzowania śrub mocujących u podstawy, po zakończeniu założyć odpowiednie podkładki, rozpoczynać korekcję od lin wymagających wydłużenia.

5.4. Pomiary obiektów powłokowych

Najczęściej spotykanym typem obiektów wielkokubaturowych są budowle powłokowe, których powierzchnia ma kształt bryły obrotowej: hiperboloidy, paraboloidy, walca, kuli. Tak budowane są między innymi: chłodnie kominowe, zbiorniki gazu, cieczy, materiałów sypkich, poszycia dachowe niektórych hal, anteny radioteleskopów itp. Swemu kształtowi zawdzięczają one znaczną sztywność (odporność na zginanie), dzięki czemu umożliwiają uzyskanie znacznych rozpiętości i wysokości; są więc często stosowane wtedy, gdy ze względów eksploatacyjnych nie można stosować podpór wewnętrznych. Równocześnie jednak, budowle powłokowe wymagają bardzo precyzyjnej realizacji a w trakcie eksploatacji konieczne jest precyzyjne kontrolowanie geometrii ich kształtu.

5.4.1. Pomiary chłodni kominowych

Chłodnie kominowe – wielkokubaturowe urządzenia niezbędne dla funkcjonowania elektrowni – mają za zadanie chłodzenie wody krążącej w obiegu zamkniętym. Wśród chłodni kominowych o większych rozmiarach najbardziej rozpowszechnione są chłodnie hiperboloidalne; umożliwiają one osiągnięcie

dobrych efektów eksploatacyjnych przy ograniczonym zużyciu materiałów konstrukcyjnych. Najczęściej są to budowle żelbetowe. Szczególna konstrukcja, oraz warunki pracy tych wysokich budowli (zazwyczaj ponad 100 metrów) powodują, że zarówno przed oddaniem do eksploatacji, jak i w jej trakcie, są starannie mierzone ich odchyłki projektowe. Charakterystyczną cechą tych obiektów jest stosunkowo mała grubość muru (kilkadziesiąt centymetrów – zmniejszające się z wysokością), wobec ogólnych – znacznych rozmiarów chłodni. Konieczne jest więc bardzo dokładne zachowanie projektowych wymiarów; odstępstwa budowniczych od założonej przez projektantów technologii czy od kształtu i wymiarów były przyczyną wielu katastrof.

Odstępstwa powłoki chłodni od kształtu projektowego są wynikiem wpływu rozmaitych czynników i zjawisk występujących zarówno w trakcie jej wznoszenia, jak i w czasie eksploatacji:

- dokładności geodezyjnych pomiarów realizacyjnych,
- wpływu wiatru i zmian termicznych w trakcie budowy,
- nierównomiernego osiadania chłodni,
- wpływu obciążenia urządzeniami montażowymi,
- odkształceń i uszkodzeń eksploatacyjnych,
- dobowych odkształceń związanych z nasłonecznieniem i wiatrem.

Pomijając zasady geodezyjnej obsługi wznoszenia chłodni, omówimy skrótowo metodykę wyznaczania odchyłek projektowych – pomiaru wykonywanego przed oddaniem obiektu do eksploatacji i ponawianego okresowo w celu wykrycia przemieszczeń i odkształceń. Pośród stosowanych metod pomiarowych wyróżnia się dwa podejścia: pomiar widocznych na tle nieba konturów widocznych ze stanowisk otaczających chłodnię (np. metoda „otaczających stycznych”), oraz pomiar punktów kontrolowanych na powierzchni płaszcza chłodni – sygnalizowanych lub nie. Wynikiem pomiaru są informacje o odstępstwach od projektowej hiperboloidy – o pionowej osi i założonych wymiarach.

Metoda otaczających stycznych jest oparta na pomiarze kierunków do punktów widocznego na tle nieba zarysu chłodni; nie wymaga więc sygnalizacji punktów kontrolowanych. Jest ona stosowana do pomiaru obiektów, których punkty można aproksymować równaniami drugiego stopnia. W tym miejscu trzeba uprzytomnić sobie następujące fakty:

- widoczny na tle nieba zarys chłodni jest krzywą przestrzenną (nie leży w płaszczyźnie pionowej),
- pionowy przekrój zewnętrznej powierzchni chłodni nie jest hiperbolą projektową, bowiem:
 - kształt hiperboli projektowej – realizowanej przez wykonawców budowli posiadać ma powierzchnia wewnętrzna (niewidoczna dla mierzącego z zewnątrz),
 - zgodnie z przyjętą technologią budowy, żelbetowa powłoka chłodni składa się (de facto) z około stu stożków ściętych – zazwyczaj o wysokości 1,20 metra każdy.

Pomiar punktów obranych na całej powierzchni sprowadza się do określenia ich współrzędnych przestrzennych:

- metodą biegunową – na przykład. przy zastosowaniu tachimetru bezzwierciadlanego [Waliszko 2002], nie wymagającego sygnalizowania mierzonych punktów,
- metodą przestrzennych wcięć w przód punktów sygnalizowanych plamką lasera, albo zaznaczonych trwale na powierzchni chłodni.

W drugim przypadku stosować można wcięcia kątowe jak i fotogrametryczne; zdjęcia fotogrametryczne można z powodzeniem stosować również w przypadku metody otaczających stycznych. Na ogół uważa się za wystarczającą dokładność pomiaru rzędu 10 mm.

Fotogrametryczne przestrzenne wcięcie w przód (punktów trwale sygnalizowanych) może być zrealizowane jedną z metod scharakteryzowanych w rozdziale 4. W każdym przypadku niezbędny jest pomiar pewnej liczby punktów kontrolnych. Można również brać pod uwagę fotogrametryczną metodę zdjęć nocnych, gdy przy otwartych migawkach dwóch kamer, laserem sygnalizuje się punkty

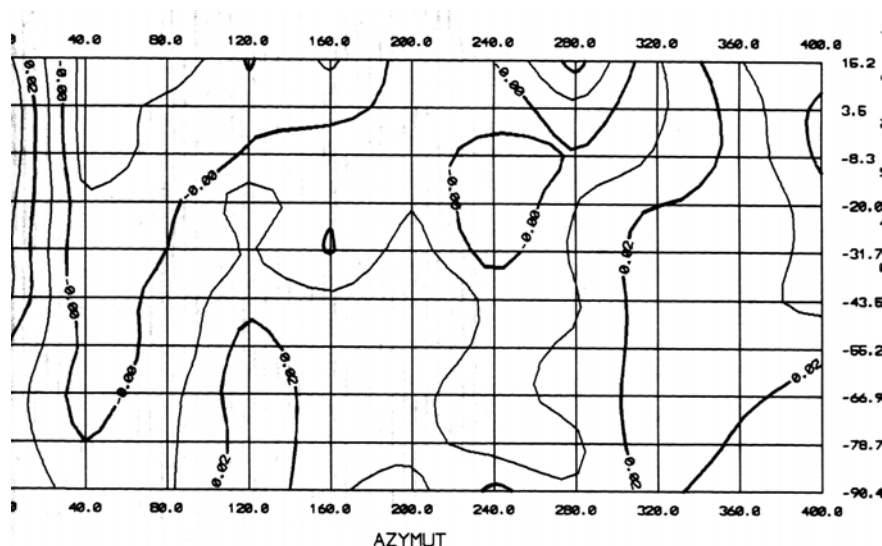
kontrolowane (w „osiowych” płaszczyznach pionowych). Do bezpośredniego określania przemieszczeń można stosować metodę par czasowych.

Zestawienia wyników pomiaru i ich ilustracje graficzne powinny – w sposób najdogodniejszy z punktu widzenia przyszłej ekspertyzy budowlanej – ilustrować anomalie kształtu chłodni. Zestawia się najczęściej:

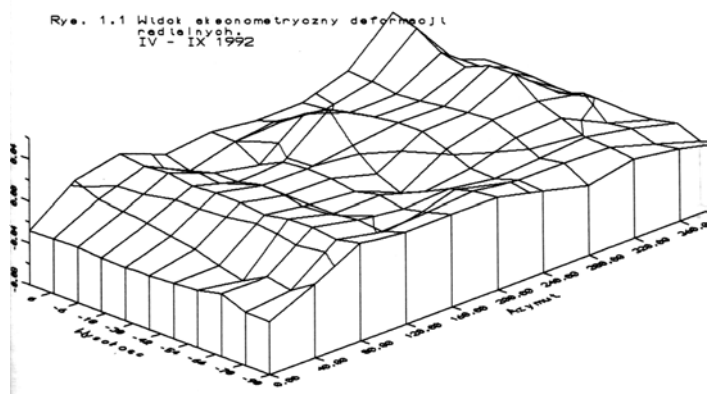
- odchyłki radialne (od nominalnych okręgów) w przekrojach poziomych na poszczególnych wysokościach,
- odchyłki od nominalnych hiperbol – w poszczególnych pionowych przekrojach,
- wielkości wychylenia osi chłodni – od pionu,
- składowe przemieszczeń i odkształceń.

Sporządza się wykresy:

- mapy izolinii radialnych składowych deformacji (rys.5.23),
- widoków aksonometrycznych – radialnych odchyłek projektowych czy deformacji (rys.5.24),
- widoki aksonometryczne deformacji chłodni – w formie szkieletowej (rys.5.25)⁵.

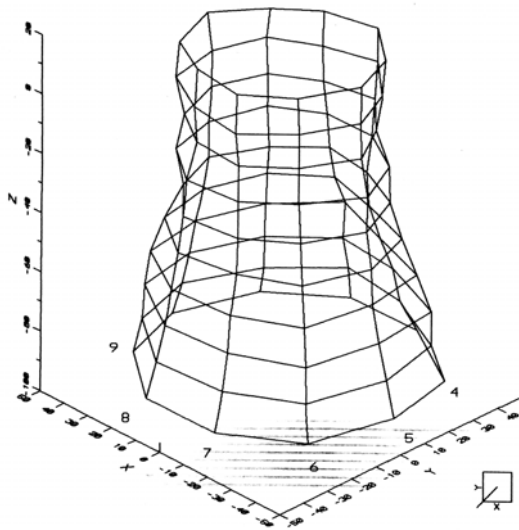


Rys. 5.23. Mapa izolinii radialnych składowych odchyłek projektowych; wysokości (z prawej strony wykresu) podane są w układzie hiperboloidy projektowej.



Rys.5.24. Widok aksonometryczny deformacji radialnych chłodni w rozwinięciu na płaszczyznę

⁵ Ilustracje 5.16, 5.17a, 5.17b zaczerpnięto z publikacji Władysława Mierzwy: „Fotogrametryczny pomiar kształtu i deformacji chłodni kominowych”; Konferencja n/t „Naprawa i modernizacja chłodni kominowych”. Bełchatów 1995



Rys. 5.25. Widok aksonometryczny zdeformowanej chłodni (w postaci szkieletowej)

Metodyka fotogrametryczna posiada ogólnie fotogrametryczne zalety wynikające z dokumentalnej wartości zdjęć i możliwości kameralnego powtarzania obrazów, czy kontroli pomiaru; jest równocześnie nieopłacalna, jeżeli liczba mierzonych fotogrametrycznie punktów nie przewyższa znacznie liczby geodezyjnie mierzonych punktów kontrolnych.

5.4.2. Pomiary hal przemysłowych i widowiskowych

Hale przemysłowe są typowymi budowlami fabrycznymi. Charakteryzują je duże rozpiętości i znaczne wysokości. W hali ustawione są maszyny do produkcji, obróbki, czy montażu urządzeń. Do przemieszczania ciężarów, często instalowane są suwnice. Hale przemysłowe są budowlami jedno- lub dwunawowymi. Konstrukcję dachową dźwigają słupy, ustawione w odległościach 4 – 7 metrów. Oświetlenie hal uzyskuje się głównie za pomocą okien w ścianach bocznych i świetlików dachowych. Głównymi materiałami konstrukcyjnymi są stal i żelbet.

Stateczności hal mogą zagrażać:

- osiadanie terenu,
- wibracje związane z pracą maszyn, wysoka, zmienna temperatura,
- obciążenia dachu (pyłem lub śniegiem),
- korozja konstrukcji stalowych,
- błędy projektowe i wykonawcze.

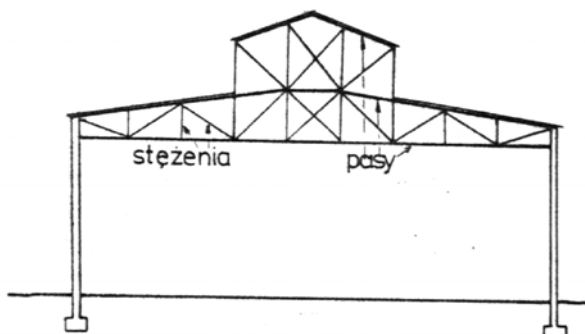
Ze względu na wpływ wymienionych czynników, hale przemysłowe podlegają okresowym pomiarom kontrolnym; w trakcie pomiaru kontroluje się:

- pionowość słupów, ścian i innych elementów nośnych (np. kratownic),
- wysokość reperów osadzonych w fundamencie, ścianach lub słupach,
- jezdnie podsuwnicowe, szczeliny dylatacyjne oraz spękania, a także inne elementy wskazane przez rzeczoznawców budowlanych.

Najczęściej wykonywane są fotogrametrycznie pomiary więźby dachowej, oraz badania odkształceń więzarów dachowych.

Więzar może się składać z jednego, dwóch, lub trzech pasów; może być żelbetowy, lub stalowy. Pasy mogą być połączone elementami poprzecznymi (steżeniami) (rys 5.24). Znajomość konstrukcji pozwala przewidzieć rodzaj deformacji (płaskie, pionowe, podłużne, boczne). Mierząc więzary fotogrametrycznie, najwygodniej jest stosować metodę jednoobrazową (patrz rozdział 5.1.1. W

przypadku pomiarów cyklicznych, powinno się stosować metodę pomiaru par czasowych; ten sposób zabezpiecza przed wpływem (niebezpiecznych dla metody jednoobrazowej) błędów związanych z trwałymi anomaliami kształtu żelbetowych prefabrykatów (wyboczenia, nierówności itp.).



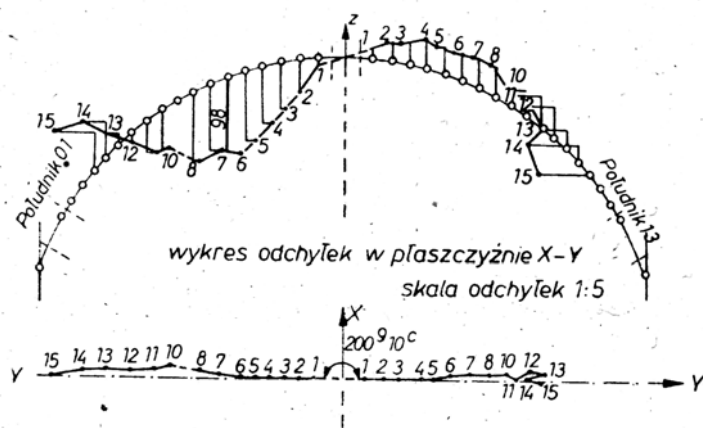
Rys.5.26. Konstrukcja dachowa hali przemysłowej

W przypadku więźby dachowej o złożonym kształcie – jak to ma często miejsce w przypadku hal widowiskowych – można stosować stereofotogrametryczne zdjęcia szeregowe zenitalne. Sieć zdjęć najwygodniej jest wtedy rozwiązać metodą terotriangulacji.

Okresowe pomiary słupów nośnych hal przemysłowych, wspierających suwnice mostowe wolnostojących - również warto wykonywać fotogrametrycznie; trudno jest bowiem ocenić zmianę kształtu czy wychylenia słupa, jeśli po kolejnym pomiarze geodezyjnym, zostanie zasłonięta część słupa – nie ma wtedy z czym porównać stanu aktualnego.

Pokrycia dachowe hal widowiskowych budowane są na ogół jako kopuły o kształcie walcowym lub kulistym. Takie rozwiązanie umożliwia osiągnięcie dużej rozpiętości i wytrzymałości lekkiej konstrukcji dachowej. W kopułach siatkowych zasadniczy (negatywny) wpływ na wytrzymałość mają odchylenia węzłów konstrukcyjnych od położenia projektowego. Pociąga to za sobą konieczność wykonywania pomiarów 3D setek punktów. Wymagane są dokładności milimetrowe.

Opisy pomiarów kopuł o różnych kształtach można znaleźć w literaturze [Borkowy, Juzwa, Majde, Mercik, Szczeciński, 1984] z której także zaczerpnięto ilustrację - rys. 5.25. W latach wykonywania opisanych pomiarów stosowano z powodzeniem autogrametryczne opracowania (na A 5 Wilda). Zdjęcia pionowe i nachylone tworzą sieć terotriangulacji, którą można także rozwiązać metodą niezależnych wiązek, stosując dostępne, popularne programy (vide rozdział 4.4).



Rys. 4. Hala A – przykładowy wykres odchyłek węzłów

Rys. 5.27. Przykładowy wykres odchyłek projektowych węzłów konstrukcji dachowej - wg [Borkowy, Juzwa, Majde, Mercik, Szczeciński, 1984]

5.4.3. Pomiary kształtu reflektorów anten

Zadaniem pomiarowym wymagającym od fotogrametry osiągnięcia najwyższych – możliwych do osiągnięcia – dokładności, bywają pomiary powierzchni dużych anten o różnym przeznaczeniu: radarowe, radioteleskopowe, radiolokacyjne i inne, o kształcie paraboloidalnym, kulistym, hiperboloidalnym. Przy pomiarach niektórych anten wymagana jest dokładność względna rzędu 1 : 500000 (stosunek błędu liniowego do rozpiętości obiektu pomiaru) [Fraser, 1996]. Podobne dokładności podają [Forrest, 1966], [Ghosh, 1966].

Precyzyjny pomiar anteny radarowej opisują [Błędzka, Preuss, 1984]. Reflektor anteny (o wymiarach 13x19x3 metry), miał kształt paraboloidalny; ażurową powierzchnię tworzyła siatka z drutu o oczkach centymetrowych. Celem pomiaru było wyznaczenie kształtu anteny i położenia promiennika z dokładnością 1 milimetra.

W opisywanym przypadku najodpowiedniejszym rozwiązaniem była metoda niezależnych wiązek; najlepiej – rozwiązana samokalibracyjnie. Nie mogąc użyć - jak to czynili Amerykanie - płyt fotograficznych odpowiedniej jakości (szkło o płaskości $\pm 5 \mu\text{m}$, o grubości 6mm), zastosowano standardowe płyty TO 1 i długoogniskową kamerę UMK 30/1318 Zeissa. Zdjęcia zbieżne (łącznie 6) wykonywano na dwóch różnych poziomach. Punkty kontrolne były sygnalizowane (jako krzyże maltańskie); zasygnalizowano również około 1400 punktów kontrolowanych. Współrzędne punktów kontrolnych pomierzono geodezyjnie z dokładnością 1 milimetra.

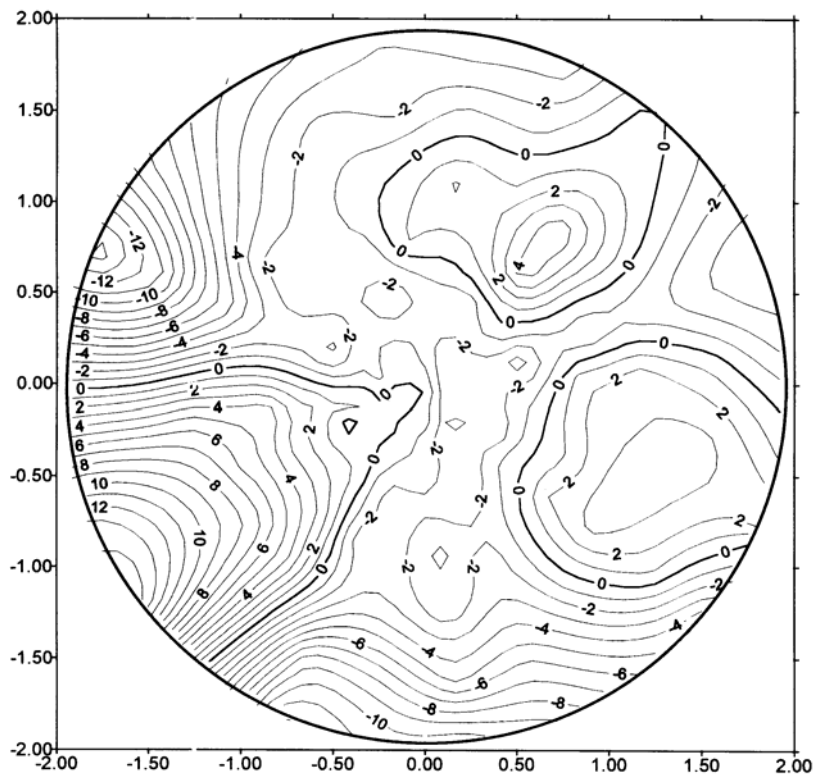
Prace kameralne obejmowały:

- monokularny pomiar współrzędnych tłowych (na stekometrze),
- wyznaczenie rzeczywistego kształtu anteny,
- określenie odchyłek od kształtu projektowego,
- analizę dokładności.

Uzyskano następujące dokładności wyznaczenia współrzędnych punktów definiujących kształt reflektora: $m_x = \pm 0,4 \text{ mm}$, $m_y = \pm 0,4 \text{ mm}$, $m_z = \pm 0,5 \text{ mm}$.

Podobne dokładności uzyskali Alina i Andrzej Wróblowie [Gabryś, Sobczyk, Wróbel, Wróbel, 1995] w trakcie fotogrametrycznego pomiaru kształtu czaszy parabolicznej anteny satelitarnej (o średnicy 4.metrowej). Zdjęcia zbieżne wykonano (dwukrotnie, niezależnie) kamerą UMK 10/1318 z bazy 5.metrowej (z odległości 5 metrów) Pomiar stereoskopowy 27 punktów kontrolowanych dostarczył współrzędnych tłowych obu zdjęć. Obliczenia współrzędnych terenowych wykonano programem MODSYM1 (W. Mierzwy)

W dalszej kolejności określono odchylenia rzeczywistej czaszy od projektowej paraboloidy. Wielkości te przedstawiono graficznie w postaci wykresu izolinii (rys.5.26). Średnie wartości różnic współrzędnych pomiędzy wynikami 2 niezależnych pomiarów (d_x , d_y , d_z) nie przekroczyły 0,5 mm.



Rys. 5.28. Izolinie odchylenia rzeczywistej powierzchni czaszy od wyaproksymowanej paraboloidy

5.5. Pomiary procesów szybkozmiennych

Celem pomiaru jest określenie składowych przemieszczenia w funkcji czasu; zadania pomiarowe mogą być rozmaite:

- opis procesu odkształcania się obiektu,
- określenie trajektorii punktu, lub obiektu,
- określenie amplitudy drgań.

Szybki przebieg zmian stwarza konieczność stosowania specjalnych kamer, rejestrowania czasu i regulowania interwału czasowego kolejnych rejestracji, oraz synchronizacji fotografowania - w przypadku stosowania dwóch (czy więcej) kamer. Specyficzne rozwiązania techniczne tych problemów zostaną omówione.

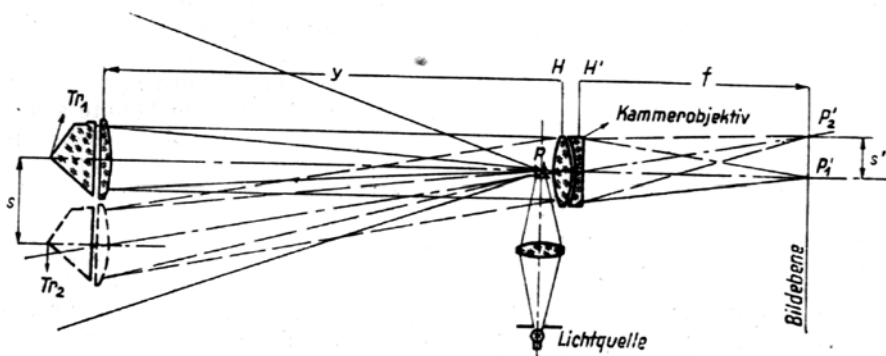
Kamery wolnopowtarzalne (np. fototeodolity) są rzadko stosowane w fotogrametrii dynamicznej - nie stwarzają one bowiem możliwości osiągnięcia niezbędnej, wysokiej częstotliwości. Czasem jedynie stosuje się je, dokonując rejestracji kilku stanów na jednej kliszy - była o tym mowa w rozdziale 5.1.1. Podstawowym - do niedawna - narzędziem rejestracji procesów szybkozmiennych były kamery kinematograficzne. Specjalne kamery szybkobieżne pozwalają na wykonywanie kilkudziesięciu tysięcy (a nawet jeszcze więcej) rejestracji w ciągu sekundy. Często stosuje się kamery o ciągłym przesuwie filmu. Aktualnie - najważniejszym narzędziem stają się video kamery z powierzchniowymi matrycami CCD.

Problem rejestracji czasu pomogą rozwiązać - w najprostszych przypadkach - stopery rejestrowane wraz z mierzonym dynamicznie obiektem; w przypadku kamer specjalnych kontrolowanie szybkości przesuwu filmu umożliwiają zarejestrowane na skraju filmu kreseczki „noniusza czasowego”.

Problem synchronizacji rejestrowania obrazów kilkoma kamerami rozwiązuje się różnymi sposobami. Jeśli synchronizacja na poziomie 0,1 sekundy nie jest wystarczająca, stosuje się elektromagnetyczne wyzwalanie migawek (gwarantujące synchronizację na poziomie setnych części sekundy), albo stosuje się podejścia odmienne. Zdjęcia wykonuje się na przykład w nocy; pozwala to wcześniej otworzyć migawki kamer, zaś moment oświetlenia obiektu (np. lampą błyskową) jest wspólny dla wszystkich kamer.

Wariantem tego nocnego rozwiązania jest fotografowanie kilku pulsujących (w znanym interwale czasowym) światełek mierzonego obiektu; czasem był to wodowany statek [Linsenbarth, Rymarowicz, 1972], czasem oblatywany samolot bojowy. Interesująca jest mielecka koncepcja śledzenia zachowania się oblatywanego samolotu, drogą rejestracji (kamerami video) stałych punktów naziemnych, co pozwoli określić zmiany pozycji oblatywanego samolotu.

Rytmiczne zapalanie się światła w precyzyjnie określonym interwale czasowym, to idea stroboskopu. Lamy stroboskopowe specjalnego przeznaczenia (np. produkowane przez Philipsa) umożliwiają oświetlanie poruszającego się obiektu w regulowanym interwale czasowym - osiągnięta jest częstotliwość rzędu kilkuset Hz, a czas trwania krótkotrwałego błysku (ksenonowej lampy błyskowej) może wynosić kilkanaście mikrosekund [Linsenbarth, 1974].

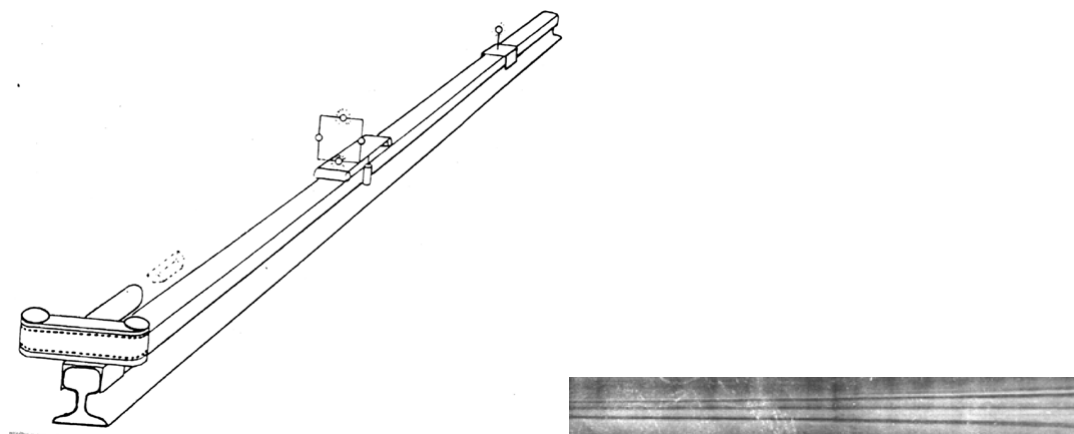


Rys. 5.29. System Zeiss-Kulka (wg. Lacmann O. 1950)

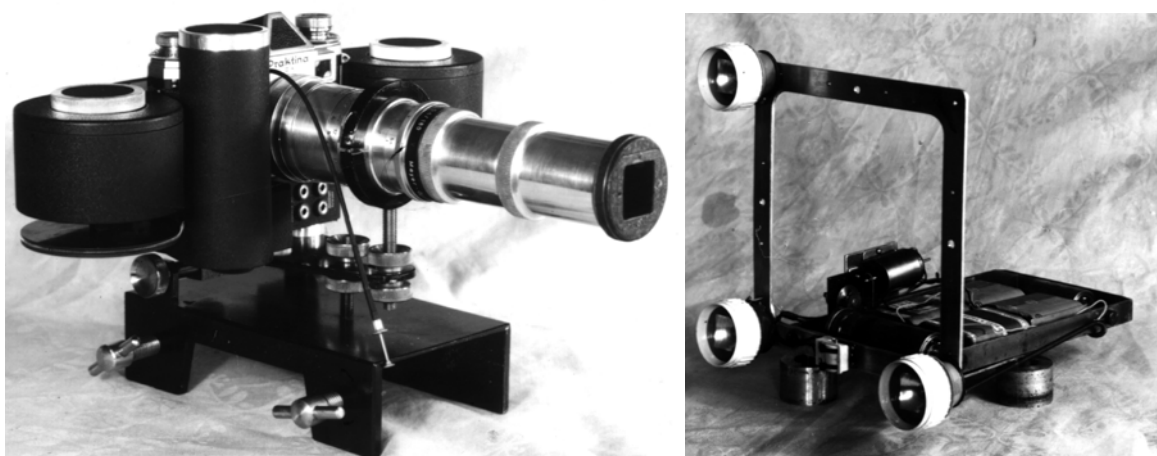
Problem uzyskania obrazu przemieszczenia w możliwie dużej skali rozwiązuje system Zeiss-Kulka przedstawiony na rys. 5.29. W aparacie tym światło znaczka S jest kierowane - przez pryzmacik umieszczony przed obiektywem kamery - na pryzmat czworościenny umocowany na obiekcie. Promień świetlny powraca jako równoległy - to znana cecha tego pryzmatu. Aby uzyskać ostre odwzorowanie obrazu znaczka na filmie (P'), przed pryzmatem umieszcza się soczewkę skupiającą o ogniskowej dwukrotnie większej niż odległość pryzmatu od obiektywu. Tym sposobem, odwzorowana na ruchomym filmie zmiana położenia punktu P' może być równa przemieszczeniu pryzmatu (skala odwzorowania przemieszczenia wynosi 1 : 1). Na ruchomym filmie zapisuje się krzywa, której rzędne są równe przemieszczeniom pryzmatu (w kierunku prostopadłym do przesuwu filmu).

Sposoby fotogrametrii dynamicznej można wykorzystać do pomiaru kształtu stalowych przewodników i szyn suwnicowych - metodę objaśniają rysunki: 5.27 i 5.28 [Bernasik, 1970]. Zestaw pomiarowy składa się z długoogniskowej kamery na film o wolnym, ciągłym przesuwie (ustawianej na początku szyny), wózka przewożącego po szynie dwie pary światełek, oraz stacjonarnego światełka ustawianego na końcu szyny. W celu określenia niwelety szyny (jako pionowych odchyleń od prostej wyznaczonej przez środek rzutów i światełko końcowe), zapala się na jadącym wózku parę pionowych światełek. W celu określania odchyleń poziomych, zapala się na wózku światełko poziome, przed

obiektywem umieszcza się pryzmat Dove'go (skręcający wiązkę promieni o 90°). Pomiar wywołanego filmu dostarcza wyników - pionowych i poziomych odchyłeń od stałej prostej. Odcięta punktu mierzonego jest ustalana na podstawie porównania prawdziwej bazy (odległości światełek), oraz obrazu tej bazy (w chwilowej skali obrazu). Ten sposób, wypróbowany do pomiarów szyn suwnicowych, z lepszym efektem może być wykorzystany do pomiarów przewodników szybowych i temu podobnych obiektów.



Rys. 5.30. Zasada pomiaru nieprostoliniowości szyny i fragment filmu z zarejestrowanymi obrazami światełek: dwóch zainstalowanych na wózku i jednego stałego (prosta odniesienia)



Rys. 5.31. Kamera rejestrująca na filmie przesuwającym się w sposób ciągły (rysunek z lewej) i wózek ze światełkami

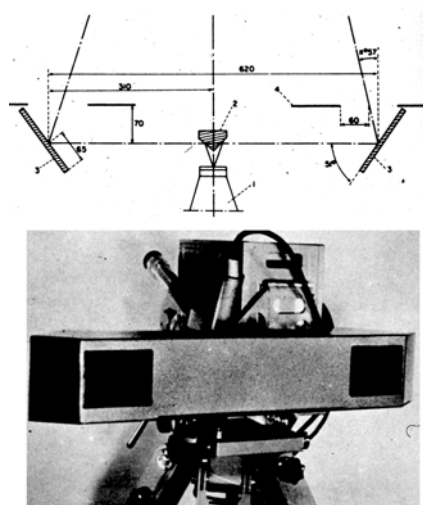
Szereg oryginalnych, ciekawych rozwiązań, zastosował w swoich pracach - autor najwartościowszych polskich zastosowań fotogrametrii dynamicznej - prof Andrzej Majde.

W 1969 roku, wraz z prof. T. Bednarskim dokonał pomiarowego prześledzenia procesu zmian kształtu membrany blaszanej tłoczony metodą wybuchową.⁶

Do rejestracji zjawiska wykorzystano szybkobieżną kamerę filmową PENTAZET 35 mm (Autorom wystarczyło 8 000 zdjęć/sek, ale częstotliwość kamery sięgała 32 000 Hz)⁷, wyposażoną w specjalnie

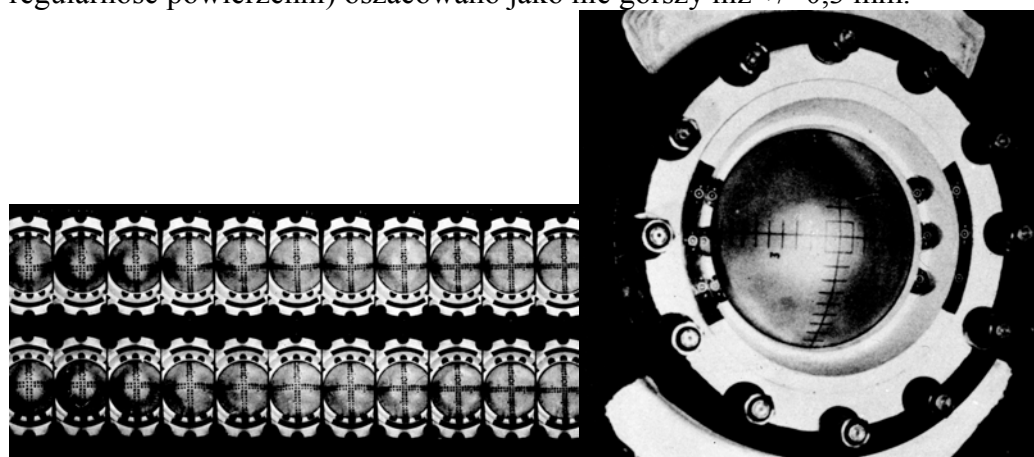
⁶ Opracowano w oparciu o [Majde, 2002]; zamieszczono oryginalne ilustracje Autora (wraz z Jego podpisami i przypisami), wykorzystując obszerne fragmenty tekstu.

skonstruowaną lustrzaną przystawkę stereoskopową. Na skraju filmu naświetlany był znacznik czasu w interwale 0,001 sek



Rys. 5.32. Szybka kamera filmowa PENTAZET 35 z przystawką stereoskopową. Dolna część obrazka pokazuje wygląd zestawu od strony przedmiotowej, górna - geometrię przystawki oraz bieg promieni od (niewidocznego) obiektu aż do negatywu (na dole rysunku).

Odrębnym problemem była synchronizacja momentów włączenia kamery i detonatora. Problem rozwiązał specjalnie skonstruowany sterownik, włączający najpierw kamerę a po eksperymentalnie ustalonym czasie - detonator. Osnowę przestrzenną, niezbędną dla metody DLT, stanowiły cztery pary punktów zasygnalizowanych w głębi i na powierzchni pierścienia mocującego membrany. Film po rozcięciu i zamianie stron (lewy obraz rzutowany był na prawą stronę filmu) mierzony był na STECOMETRZE Zeiss'a. Średni błąd pomiaru (dokładność pomiaru, zgodność na osnowie i wreszcie regularność powierzchni) oszacowano jako nie gorszy niż $\pm 0,3$ mm.



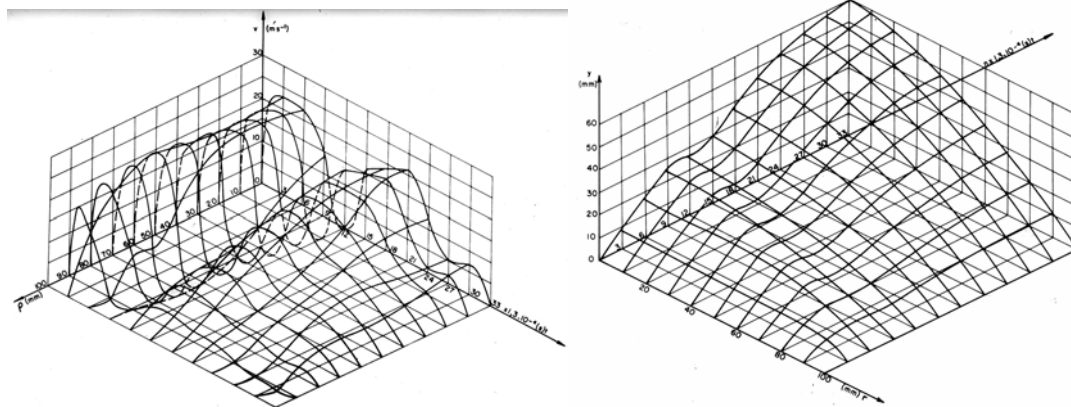
Rys. 5.33. Filmowy zapis procesu tłoczenia wybuchem.

⁷ Ciekawa jest konstrukcja takiej kamery, gdyż obraz jest naświetlany przez zsynchronizowany z szybkością przesuwu filmu wirujący bęben z dużą liczbą luster; różne zakresy częstotliwości obsługiwane są przez różne bębny, organizujące układ kadrów na filmie w sobie właściwy sposób.

- a) Fragment stereoskopowego filmu, obrazującego początkową fazę tłoczenia wybuchowego; początek procesu z prawej strony. Narastająca od prawej do lewej struktura światłocieni to efekt szybkiego uwypuklenia się membrany. Przy uważnym przyjrzeniu się kolejnym kadrów widać nawet, że formowanie docelowej czaszy zaczyna się na skrajach - środek membrany w tej fazie tłoczenia to dalej płaski lub niemal płaski okrąg, zmniejszający się z kadru na kadr. W niefachowej interpretacji fotogrametry faza ta to efekt działania czoła fali uderzeniowej, rozchodzącej się równomiernie od miejsca wybuchu; efekt działania spowodowanego wybuchem ciśnienia ujawni się dopiero później.
- b) Połówka kadru, czyli jedno ze zdjęć stereogramu. Widać na nim wyraźnie dwanaście śrub, mocujących pieścien i membranę do ścianki zbiornika, dwanaście fotopunktów rozmieszczonych w głębi i na zewnątrz pierścienia mocującego, a fragmentarycznie również również naniesione na membranie cztery promienie.

Wyniki badań ilustrują wykresy (rys. 5.31). Warto dodać, że mimo pozornie dobrej gładkości przebiegów w czasie i przestrzeni kolejne fazy obliczeń musiały być poprzedzone wygładzaniem wyników etapu poprzedniego. Dla dokończenia charakterystyki badanego procesu warto przytoczyć parę jego parametrów. Otóż w ciągu 0.003 sek. wykonano 24 stereogramy, a ich opracowanie wykazało, że:

- stalowa, płaska początkowo membrana przekształciła się w czaszę o wysokości ok. 80 mm;
- szybkość tłoczenia wzrosła od zera (przed wybuchem) do ok. 23 m/sek (do wyobraźni lepiej przemawia 75 km/godz), spadła nieco poniżej zera, wzrosła do ok. 21 m/sek a później falowo (ale już z silnie tłumioną amplitudą) spadła do zera;
- przyspieszenia sięgały 8g (tzn najpierw maksymalne dodatnie, potem równie wielkie ujemne, znów niewiele mniejsze dodatnie a potem malejące ujemne).



Rys. 6.34. Graficzna prezentacja wyników pomiaru tłoczenia wybuchowego -

- a) Czasoprzestrzenny rozkład przemieszczeń uśrednionego promienia. Proszę zwrócić uwagę na wyraźnie widoczny efekt przemieszczania się czoła fali uderzeniowej - membrana odkształca się począwszy od skrajów, a jej stale malejąca część środkowa przemieszcza się wraz z czołem fali i odkształca od skrajów ku środkowi membrany.
- b) Rozkład przyspieszeń tłoczenia. Proszę zwrócić uwagę na dużą niejednorodność procesu, spowodowaną zapewne kombinacją działania fali uderzeniowej (początek procesu), wywołanego wybuchem gwałtownego wzrostu ciśnienia wewnątrz zbiornika (druga faza) oraz dalszymi, wtórnymi czynnikami o znacznie już mniejszej energii.

Inne, znaczące opracowania prof. A. Majde, związane z badaniami dynamicznych procesów technologicznych i zjawisk, dotyczyły [Majde 2002]:

- badania rozrzutu odłamków skalnych w kamieniołomach,
- urabiania odstrzałem (podstawowa technologia pozyskiwania kamienia przemysłowego czy drogowego),
- nawożenie agrolotniczego,
- pomiaru powierzchniowej prędkości nurtu Narwi,
- ruchu zęba w zębodole,
- ruchów wysięgnika żurawia budowlanego,
- zagęszczania mieszanki betonowej,
- ugięć i drgań mostów i wiaduktów,
- pomiarów propagacji mikrozarysowań siatkobetonu,
- określania rozkładu względnej gęstości strumienia proszku gaśniczego,
- pomiarów trajektorii cząstek w komorze Wilsona (koncepcja).

5.6. Fotogrametria na kopalniach odkrywkowych

Zastosowania fotogrametrii w górnictwie dotyczą zarówno eksploatacji podziemnej jak i odkrywkowej, jednak w tym opracowaniu zajmiemy się głównie górnictwem odkrywkowym; o podziemnym zastosowaniu „płaszczyzny światła” była mowa w rozdziałach 5.1.2 i 5.1.3. Aerotriangulacja jest stosowana w trakcie badań deformacji powierzchni górniczych.

Fotogrametria naziemna została wprowadzona do polskich kopalń odkrywkowych (i kamieniołomów) jako metoda pozwalająca szybko opracowywać i aktualizować mapy wyrobisk, badać osuwiska, oraz do pomiaru objętości wydobytych (bądź składowanych) mas ziemnych i skalnych. Aktualne i wiarygodne informacje o stanie robót są niezbędne do ich planowania i rozliczania [Nowak, Preuss, Skalski, 1995].

Mapy wielkich kopalń odkrywkowych zazwyczaj są opracowywane autogrametrycznie; obecnie na drodze wektoryzacji stereogramu lub opracowania ortofotoskopowego zdjęć lotniczych na cyfrowej stacji fotogrametrycznej (CSF). Drugie, ważne zastosowanie znalazła fotogrametria przy pomiarze osuwisk; podstawową zaletą jest w tym przypadku możliwość określania przemieszczeń bez konieczności posyłania pomiarowych na zagrożony teren. Śledzenie przemieszczeń wielkich mas ziemnych na przestrzeni wielu lat bywa oparte o porównanie dokładnych map warstwicowych z różnych okresów (opracowanych często metodą fotogrametryczną). Pomiary osuwisk i monitorowanie zboczy osuwiskowych bywa jednak oparte o określanie przemieszczeń punktów kontrolowanych (sygnalizowanych bądź naturalnych). Wektory przemieszczeń tych punktów, bądź inne graficzne prezentacje ukazujące rozkład przemieszczeń (np. izolinie), mogą stanowić materiał do dalszych ekspertyz i analiz. Do pomiaru przemieszczeń na zdjęciach często jest stosowana metoda par czasowych, zaś do obliczania składowych wektorów przemieszczeń stosuje się rozmaite metody analityczne.

5.6.1. Określanie objętości urobku

Do określania kubatur urobku (wydobytej kopaliny lub zdjętego nadkładu), czy też zwałowanej ziemi stosowane są rozmaite metody [Sitek, 1991]. Niezbędne dane do obliczeń objętości można pozyskiwać bezpośrednio – w trakcie pomiaru stereogramu (na autografie, CSF, czy na stereokomparatorze), albo pośrednio – odczytując odpowiednie wartości z mapy sytuacyjno-wysokościowej.

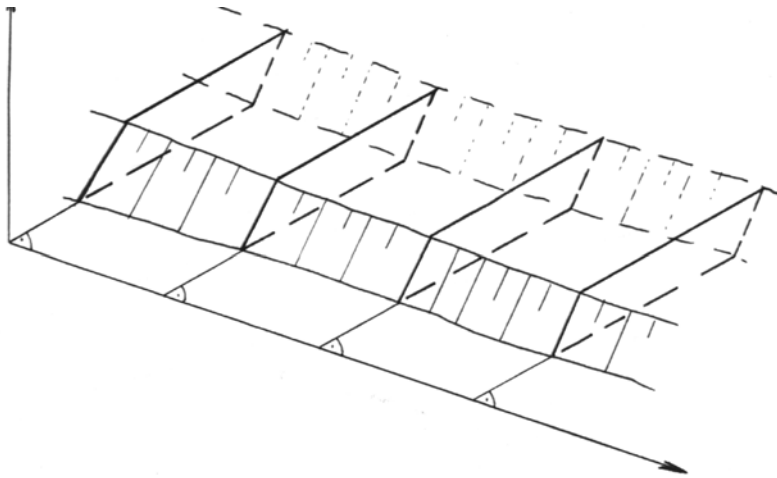
W zależności od rodzaju eksploatacji górniczej (ścianowe urabianie skarp, pokładowe zdejmowanie nadkładu, lub kopaliny, itd.) stosuje się:

- metodę pionowych przekroji poprzecznych,
- metodę średniej miąższości,

- metodę siatki poziomej,
- metodę siatki pionowej, oraz inne – dostosowane do szczególnych warunków (np. wycinanie brył o regularnym kształcie kamieniołomach marmuru).

Stereogramy naziemne powtarzane w kolejnych stanach z tych samych stanowisk (najlepiej przy zachowaniu tej samej orientacji zdjęć) są świetnym materiałem do bezpośredniego określania kubatur wszystkich wymienionymi metodami. Współrzędne można rejestrować, mierząc model w CSF (lub w autografie). Posiadając aktualne i dostatecznie dokładne mapy dwóch porównywanych stanów, można z nich odczytywać wielkości niezbędne w przypadku stosowania pierwszych dwóch z wymienionych metod.

Metoda pionowych przekroi poprzecznych zakłada pozyskanie współrzędnych naroży brył zawartych między pionowymi przekrojami skarp – pokazanymi na rys. 5.32.

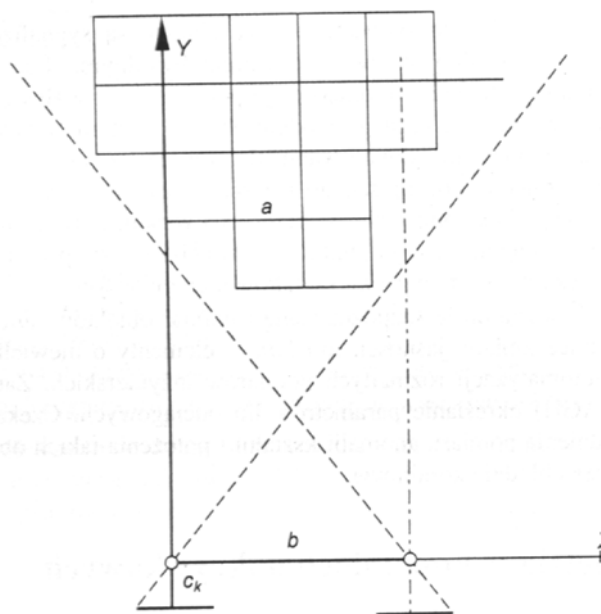


Rys. 5.35. Pionowe przekroje poprzeczne skarp 2 stanów: linia ciągła – skarpa w stanie 1 , linia przerywana – skarpa w stanie 2 (wtórnym)

Objętość bryły elementarnej oblicza się jako iloczyn średniej powierzchni przekroju i odstepu między przekrojami.

W przypadku eksploatacji pokładami o niezbyt zróżnicowanej grubości, można stosować *metodę średniej miąższości*. Cały obszar frontów eksploatacyjnych – zawarty między dwoma stanami – dzieli się na bryły o pionowych krawędziach. Określa się objętość jako iloczyn średniej wysokości (miąższości pokładu) przez powierzchnię (poziomego przekroju bryły).

Metoda siatki poziomej zakłada określanie - na podstawie stereogramów kolejnych stanów - zmian wysokości w punktach rozmieszczonych w narożach zaprojektowanej poziomej siatki kwadratów (rys. 5.33).



Rys. 5.36. Siatka pozioma w układzie stereogramu normalnego.

Wykonując pomiar na stereokomparatorze, położenie dowolnego naroża siatki (X, Y) można znaleźć nastawiając obliczone: paralaksę podłużną p i współrzędną tłową x' :

$$x' = \frac{X \times c_k}{Y} \quad p = \frac{b \times c_k}{Y} \quad /5.18/$$

Mierząc okresowo (za każdym razem w tych samych punktach) współrzędne z , można określać wysokości terenowe w kolejnych stanach: Z^1, \dots, Z^i . Objętość materiału zdjętego na polu jednego kwadratu (o boku a) można obliczyć:

$$v = a^2 \cdot (Z^i - Z^1)_{sr} = a^2 \cdot \Delta Z_{sr} \quad /5.19/$$

Objętość całkowitą na obszarze objętym pomiarem oblicza się według wzoru:

$$V = \sum v = \frac{[r \times \Delta Z]}{[r]} \quad /5.20/$$

gdzie:

- r - waga (z przedziału 1-4) zależna od liczby kwadratów przylegających do danego naroża siatki,
- s - powierzchnia objęta siatką kwadratów.

W przypadku pomiaru na CSF lub na autografie współrzędne nastawia się (X, Y) i wyznacza (Z^i, Z^1) w mierze terenowej.

Metoda siatki pionowej dostosowana do eksploatacji ścianowej. Mierząc stereogram na stereokomparatorze, naroża siatki nie są tym razem określane płaskimi współrzędnymi terenowymi,

ale współrzędnymi tłowymi (x', z'), natomiast mierzy się - dla poszczególnych stanów - paralaksy podłużne: $p^1 \dots p^i$.

Najbardziej uniwersalnym jest rozwiązanie opisanego problemu oparte o numeryczny model terenu.

5.6.2. Pomiary osuwisk

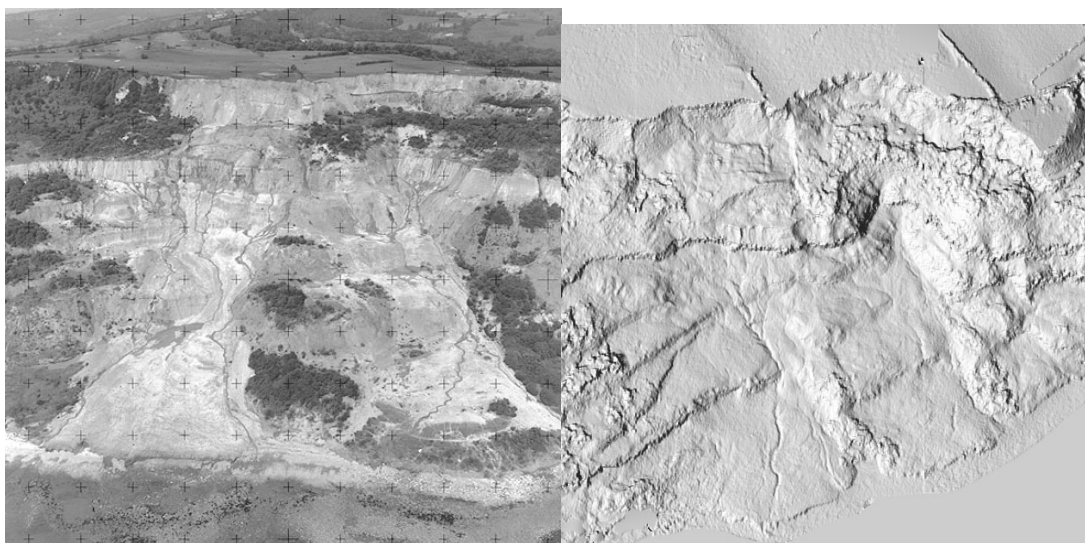
Badania stateczności zboczy i pomiary osuwisk stanowią zagadnienie wykraczające poza problematykę górnictwa, ale najczęściej są z kopalnictwem odkrywkowym związane. Niezależnie od sytuacji zmuszającej do monitoringu zboczy osuwiskowych, metodyka fotogrametryczna jest podobna. Zagadnienie najczęściej sprowadza się do wyznaczania zmian współrzędnych przestrzennych kontrolowanych punktów, ale można też określać zmiany kubatur, porównywać mapy warstwicowe.

Istnieje wiele metod badania osuwisk. Czynnikiem decydującym o wyborze metody jest wielkość obiektu. W przypadku rozległych osuwisk najczęściej stosuje się metodę fotogrametrii lotniczej [Fraser, Stiliker, 1983] lub satelitarnej – przykłady można znaleźć w publikacjach [Singhroy, Mattay, 2000], gdzie wykorzystano zobrazowania SAR. W przypadku mniejszych osuwisk stosuje się fotogrametrię naziemną [Ostaficzuk, 1967].

Celem fotogrametrycznego monitoringu jest pomiar przemieszczeń punktów. Pierwszym krokiem jest projekt osnowy fotogrametrycznej. Należy zaprojektować odpowiednią liczbę stanowisk pomiarowych. W zależności od przyjętej dokładności projektuje się odpowiednią skalę zdjęć i rozmieszczenie punktów kontrolowanych i kontrolnych.

Kolejnym krokiem jest wykonanie zdjęć fotogrametrycznych i pomiar tych punktów przy pomocy dostępnego sprzętu. Następnie wyrównuje się sieć odrębnie dla każdego stanu. Na zakończenie dokonuje się szczegółowej analizy deformacji badanych punktów.

Zastosowanie automatycznego pomiaru DTM pozwala w sposób zdecydowany zwiększyć wydajność metod fotogrametrycznych. Przekład wykorzystania metody tworzenia DTM w sposób automatyczny przedstawił Chandler [Chandler, 1995] badając największe osuwisko w Europie - osuwisko "Black Van" w Wielkiej Brytanii (Rys. 5.34 i 5.35). Wykorzystując tę metodę podniósł efektywność i dokładność analizy przemieszczeń - zamiast pomiaru 10 000 punktów (metodą tradycyjną) metodą automatyczną pomiarzył 1 000 000 punktów.



Rys. 5.37. Osuwisko "Black Van"

Rys. 5.38. DTM osuwiska pomierzony w sposób automatyczny

Najnowszym trendem jest zastosowanie skanerów laserowych. Wyniki tego rodzaju prac przedstawiono w roku 2000 na konferencji w Amsterdamie. Autorzy japońscy [Ono, Tonoko, Sato, 2000] na podstawie osuwiska wielkości 400 na 130 na 110 m, wykonali szereg prac zmierzających do analizy efektywności metod zastosowanych do rozwiązania powyższego zagadnienia. Zastosowany skaner laserowy 3D okazał się najefektywniejszym narzędziem w pozyskiwaniu danych do analizy osuwisk.

Metoda skaningu laserowego dostarcza dane bardzo szybko i szczegółowo. Pozwala na pomiar punktów w sposób prosty i z dużą gęstością rozmieszczenia. Metoda ta została porównana do innych metod tj. do metody geodezyjnej (gdzie osuwisko zostało pomierzone przy pomocy Total Station i odbiorników GPS) oraz fotogrametrycznie. W przypadku metody skaningu laserowego wydajność wynosi około 10^6 punktów na godzinę pomiaru, podczas gdy w przypadku pozostałych metod można pomierzyć w przeciągu godziny około 10 punktów.

Jak widać metoda ta ma ogromną zaletę w przypadku pomiaru procesów szybkozmiennych. Jesteśmy w stanie wyprodukować przykładową mapę praktycznie w czasie trwania procesu degradacji. Przykładowy pomiar 5,2 miliona punktów trwa około kwadransa. Dane pozyskane metodą laserową można zbierać bezpośrednio w formie cyfrowej i w bardzo szybkim czasie. Topoografia i kształt może być szybko wyświetlona na komputerze (praktycznie w czasie rzeczywistym).

Metoda laserowa ma jeszcze jedną niewątpliwą zaletę. Pozwala na pomiar w nocy oraz w nienajlepszych warunkach pogodowych.

6. Ćwiczenia z fotogrametrii inżynierskiej

6.1. Pomiar kształtu i wychylenia komina

Celem pomiaru jest określenie przebiegu osi komina, jako linii łączącej środki poszczególnych przekroi, w odniesieniu do pionu poprowadzonego przez środek podstawy. Mierzy się zdjęcia poziome wykonane kamerą Photheo z trzech stanowisk: 10, 20, 30. Każda osoba mierzy wychylenia na co najmniej 2. zdjęciach (trzeci wynik można odpisać), dokonuje obliczeń, oraz graficznej kontroli wyznaczenia wychylenia.

Pomiar wychylenia na VSD

Przypomnienie kolejnych funkcji VSD: **I** (pomiar znaczków tłowych), **F5** (orientacja wewn.), **F10** (wyjście); plik wynikowy: **or_int.wyn**, **J** - pomiar punktów z rejestracją, plik wynikowy: **...or** (ale w tym ćwiczeniu będzie zapis ręczny!), **Q** (wyjście).

Pliki obrazowe: **st10_p.tif**, **st20_p.tif**, **st30_n.tif**.

Dane do orient. wewnętrznej – współrz. znaczków tłowych (mm) – kolejno „x” i „z”:

dla zdjęcia wykonanego kamerą o $c_k = 195,77\text{mm}$ (ze stanowiska 10)			
100	-81,337 29,986	200	0,000 87,140
		300	80,790 30,006
		400	0,000 -27,342
			0,020 85,112 - na „zabku”
(lewy)		(górny)	(prawy)
			(dolny)
dla zdjęć wykonanych kamerą o $c_k = 194,92\text{mm}$ (ze stanowisk 20 i 30)			
100	-80,901 44,983	200	0,000 102,300
		300	81,450 45,020
		400	0,000 -12,560

Dziennik pomiaru wychylenia komina

Stanow./nr.p	x_l	x_p	z	Δx

Wychylenie komina mierzy się, celując znacznikiem pomiarowym (kursorem) na punkty obrane parami na tej samej wysokości, po lewej (*l*) i prawej (*p*) stronie komina; numerację obserwowanych przekroi objaśniono na odbicie fotograficznej. Wychylenie oblicza się:

$$\Delta x = (x'_{jl} + x'_{jp} - x'_{ll} - x'_{lp}) * 0,5$$

Obliczenia wychyleń programem KOMIN (A.Tokarczyka)

Należy obliczyć własne $c_k = c_k + 0,01\text{mm} * \text{numer osobisty}$, dla stanowisk 10, 20, 30 i zestawić wychylenia Δx [μm].

Redakcja pliku dakom.txt – w kolejnych wierszach:

1 wiersz: **nazwisko** (jako nazwa obiektu), 2 w.: **3** (liczba stanowisk), spacja, **5** (liczba poziomów), 3-5 w.: dane n/t stanowisk (10, 20, 30): **X** [m] spacja **Y** [m] s. **0,5** * c_k [mm], s. **0.0** (γ w gradach), 6 w.: współrzędne **X, Y** komina, 7-11 w. – kolejno podaje się: **wysokość poziomu obserwacji** (w metrach) i wychylenia Δx_{10} , s. Δx_{20} , s. Δx_{30} - w mikrometrach ! Wysokości poziomów [m]: 220, 180, 140, 100, 50. Ostatni wiersz: **0 0.0 0.0 0.0**. Liczenie: **komin.exe**. Wyniki w pliku **wykom.txt**; jeżeli poprawki v są zadawalające (rzęd kilku mikrometrów), zmieniamy nazwę pliku: 3 pierwsze litery nazwiska.txt; do sprawozdania należy załączyć wydruki obliczeń. Należy sprawdzić graficznie wychylenie całkowite i sporządzić wykresy wychyleń osi komina w rzutach na płaszczyzny: **XY, ZX, ZY**.

Kontrola graficzna

Należy obliczyć wartości $Q = (\Delta x \cdot d) : c_k$ dla trzech stanowisk, wyznaczyć wychylenie metodą wstęgi wahań; porównać wynik z rezultatem uzyskanym w obliczeniach.

Współrzędne stanowisk i komina

	St. 10	St.20	St.30	Komin
X [m]	1206,07	1277,06	789,60	810,45
Y [m]	864,70	467,55	96,38	565,77

Pytania kontrolne: Czy wartości wykazane w tabeli wynikowej jako „poprawki” to wyłącznie efekt błędów pomiarowych? Jak można wykorzystać program KOMIN do obliczeń geodezyjnych (obserwacje kątowe) ?

6.2. Pomiar kształtu i odkształcenia więzara dachowego metodą jednoobrazową

Celem pomiaru jest równoczesne określenie odchylenia od prostoliniowości dolnej krawędzi więzara (stopy więzara) – na podstawie aktualnego zdjęcia, oraz odkształcenia - metodą par czasowych. Rezultatem pomiaru będą zilustrowane wykresami wielkości: deformacji aktualnych (odchylen od prostoliniowości) i odkształceń okresowych.

Dane są zdjęcia poziome z tego samego stanowiska (z 1995 i z 1996 roku) wykonane kamerą Photheo ($c_k = 194,92\text{mm}$) w ten sposób, że klisze były równoległe do więzarów. Do pomiaru wybiera się tę krawędź, która jest lepiej czytelna (tutaj - czołową). Odległość stanowiska od mierzonego więzara nr 12 - uwzględniając mimośród środka rzutów kamery względem osi pionowej instrumentu - wynosi **22,30 m**. Zdjęcia wizualizuje się w VSD jako pary czasowe: późniejsze (**hala12.tif**) – jako lewe, wcześniejsze (**hala02.tif**) - jako prawe. Pomiar więzara wykonuje się w 8 punktach: w obu punktach podparcia i w miejscach łączenia segmentów dźwigara strunobetonowego (1/4, 1/2, 3/4 długości - po 2 punkty: jeden nieco wcześniej, drugi nieco za tym miejscem). Miejsce pomiaru powinno być obrane na równym fragmencie płatwi, a kursory osadzamy w tych samych punktach obu zdjęć. Ponieważ taka identyfikacja punktu pomiaru na mierzonej krawędzi jest utrudniona, więc najpierw osadzamy kursory na pobliskim szczególnie punktowym (lub pionowym) elemencie więzara, aby po sprzęgnięciu kursorów („1”) przemieścić je na mierzoną krawędź, a po rozsprzęgnięciu (Tab.) wycelować (używając kursora pionowego) na mierzoną krawędź. -

Wyniki pomiaru rejestrujemy, po czym wykonujemy obliczenia wyników (w tym "rachunkowe poziomowanie") zgodnie z tabelą:

Dziennik pomiarowo-obliczeniowy

Nr.p (i)	$z_{i=}$ $z_{i1}-z_{i1}$ [mm]	$x =$ x_i-x_1 [mm]	$z_p =$ $z_{p1}-z_{p1}$ [mm]	$q =$ z_i-z_p	Δz [μm]	dz [μm]	ΔZ [mm]	dZ [mm]	X [mm]
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
.									.
.									.
8					0	0	0	0	.

W tabeli: $\Delta z_i = z_{i1} - \frac{z_{18}}{x_8} x_i$, $dz = q_i - \frac{q_8}{x_8} x_i$

$$\Delta Z = \frac{Y}{c_k} \Delta z \quad dZ = \frac{Y}{c_k} dz, \quad X = \frac{Y}{c_k} x$$

6.3. Badanie odkształceń wież wiertniczych wywołanych ich obciążeniem

Celem pomiaru jest określenie bezwzględnych przemieszczeń charakterystycznych punktów (węzłów konstrukcyjnych, spawów, złączy itp.) jednej z 2. „świec” zaznaczonych na odbitkach. Przemieszczenia tych punktów charakteryzują odkształcenia konstrukcji spowodowane obciążeniem wywartym przez zawieszony na wieży stalowy „przewód wiertniczy” (albo wytworzonym sztucznie przy pomocy siłownika). Zdjęcia kolejnych faz obciążenia wykonywano równocześnie z dwóch stanowisk, powtarzając rejestrację przy niezmienionej orientacji kamer. W celu podwyższenia dokładności określenia przemieszczeń, koryguje się błędy związane z niezachowaniem orientacji kamer ($\Delta\varphi$, $\Delta\omega$, $\Delta\kappa$). Niezbędne są do tego - odpowiednio rozmieszczone - **stałe** punkty kontrolne (sygnalizowane lub obrane): 11, 12, 13. Uwaga: nie są to „punkty kontrolne” w znanym znaczeniu – nie wyznacza się bowiem ich współrzędnych terenowych.

Dane są zbieżne zdjęcia poziome wykonane na stanowiskach 10 i 20 w stanach "1" i "2". Zdjęcia mierzy się **jako pary czasowe** (w VSD); wizualizuje obrazy: stanowisko 10: **A2.tif** (stan 2 – zdj. lewe) i **A1.tif** (stan 1 – zdj. prawe), stanowisko 20: **B2.tif** (stan 2 – zdj. lewe) i **B1.tif** (stan 1 – zdj. prawe). Określa się **bardzo starannie czasowe paralaksy podłużne: punktu kontrolnego** 12 (lub 22) i 6 punktów kontrolowanych, obranych we wskazanych miejscach mierzonych "świec", oraz paralaksy **poprzeczne** na bocznych punktach kontrolnych (11 i 13 lub 21 i 23). Wykonując pomiar świec należy zwrócić szczególną uwagę na identyczność punktów lewego i prawego obrazu – na tym będzie polegała „staranność” wyznaczenia podłużnych paralaks czasowych; na ogół konieczne będzie stosowanie zabiegu z pomiaru więzara – „sprzęgnięcie i rozsprzęgnięcie”.

W przypadku 2.osobowego zespołu można uzgodnić wspólne pomiary punktów kontrolnych, ale każdy powinien pomierzyć (być odpowiedzialny za pomiar) inną z dwóch świec. Kalibracyjne współrzędne znaczków tłowych (do orientacji wewnętrznej w VSD) – jak przy pomiarze kominów (dla kamery o stałej **194,92mm (st 10)**, lub **195,77 (st. 20)**. „Przy okazji” na zdjęciu „wcześniejszym” ze stanowiska 20 mierzymy ok. 10 punktów linii odciągowej (do kolejnego ćwiczenia).

W oparciu o współrzędne tłowe mierzonych punktów zestawia się ich paralaksy czasowe: $q' = z'_l - z'_p$ - dla bocznych punktów kontrolnych (11 i 13); $p' = x'_l - x'_p$ - dla pozostałych. Podłużne paralaksy punktów kontrolowanych koryguje się: $p = p' + dp_\phi + dp_\kappa + dp_\omega$. Ze względu na niewielkie wartości „x” punktów kontrolowanych, poprawki dp_ω są zanedbywalnie małe. Tak więc - pomierzone paralaksy czasowe – koryguje się według wzoru:

$$p_P = p' + \frac{q_{13}' - q_{11}'}{x_{13}' - x_{11}'} z_P - \frac{\cos^2 \gamma_{12}}{\cos^2 \gamma_P} \left(p_{12}' + \frac{q_{13}' - q_{11}'}{x_{13}' - x_{11}'} z_{12}' \right) \cong p_P' + \frac{q_{13}' - q_{11}'}{x_{13}' - x_{11}'} (z_P' - z_{12}') - p_{12}'$$

Składowe **bezwzględne** przemieszczenia punktu kontrolowanego oblicza się programem KOMIN, lub metodą macierzy transformującej. Wyniki pomiaru należy zilustrować wykresami przemieszczeń dX oraz dY punktów kontrolowanych na całej wysokości wieży.

Współrzędne i wysokości:

	$X [m]$	$Y [m]$	Do opracowania graficznego przyjmujemy wysokości:
St 10	-6,73	71.80	p-y 1 i 10: 36.5 m, 2 i 20: 30.0 m,
St. 20	87.44	52.67	3 i 30: 28.0 m, 4 i 40: 17.5 m,
Świeca 3 \cong	0,0	0.0	5 i 50: 9.1 m, 6 i 60: 3,7 m.
Świeca 4 \cong	5.78	0.0	

Pytanie kontrolne: czym różni się dX , lub dY obliczone w temacie „kominowym” od obliczonego w tym przypadku ?

6.4. Wyznaczanie parametrów linii odciągowej

Celem ćwiczenia jest określenie sił występujących w punktach zamocowania linii.

Lina (wskazana na odbitce zdjęcia wykonanego na stanowisku 20) została sfotografowana na pionowej kliszy, zorientowanej względem płaszczyzny linii pod kątem α względem normalnej do płaszczyzny linii. Stała kamery: $c_k = 195,77 \text{ mm}$.

Fotogram mierzy się w VSD (przy okazji poprzedniego ćwiczenia), rejestrując współrzędne tłowe: x i z 10 punktów linii (w tym dwa punkty zaczepienia). Aby spełnić warunek „wiotkości” linii, do obliczeń - aproksymacji linii - nie wykorzystujemy punktów skrajnych (miejsca zaczepienia linii) i obranych tam gdzie lina jest podwójna.

Współrzędne terenowe (X , Y) pomierzonych punktów obliczamy następująco: najpierw transformujemy współrzędne tłowe a następnie obliczamy współrzędne terenowe w pionowej płaszczyźnie linii:

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ c_k \\ z \end{bmatrix}$$

$$X = \frac{d}{y_t} x_t, \quad Z = \frac{d}{y_t} z_t \quad (\text{gdzie: } d=98,8\text{m}, \alpha = -4,108^\circ - 0,001^\circ * n_{\text{osob}})$$

Składowe sił naciągu oblicza się programem GEOCATEN (L. Kolondry). Przybliżone wartości: k_o , α_o , β_o (których podania wymaga program) można wydedukować: k – jest zawsze dodatnie, β – ujemne, α – dodatnie gdy lina wznosi się w lewo; wartości liczbowe k , α , β przyjmuje się w zależności od wysokości masztu; przy nachyleniu liny rzędu 45° : dla $h = 25\text{m}$ – wartość 100, dla $h = 50\text{m}$ – 200, dla $h = 100\text{m}$ – 400 itd.). Możemy więc w tym przypadku przyjmować: $k_o = 200$, $\alpha_o = 200$, $\beta_o = -200$.

Wynik uznamy za dobry, jeśli poprawki v_z nie przekraczają 10 mm. Punkty o odskakujących poprawkach v_z wyłączamy z obliczeń. M_Z należy zapisać i podać w sprawozdaniu wraz z odpisanymi: „parametrem” liny k , wartościami α , β i składowymi $F_{gx} = F_{dx} = k \cdot q \cdot 9,81$ (ponieważ „ k ” podajemy w metrach, ciężar jednostkowy liny $q = 0,9 \text{ kg/m}$, więc chcąc uzyskać wynik w niutonach, pomnożymy wyliczone F przez $9,81 \text{ m/sek}^2$). Należy prześledzić dalsze obliczenia.

Organizacyjnie – najlepiej przystąpić do obliczeń mając również wyniki pomiaru na VSD.

Określanie naciągu przy zdjęciu równoległym do liny – wariant dla GiGG

W fotogrametrycznej stacji cyfrowej VSD mierzy się – podobnie jak w stekometrze – 8-9 punktów liny (plik obrazowy B1.tif). Do orientacji wewnętrznej należałoby wykorzystać znane współrzędne znaczków tłowych – podane dla $c_k = 195,77 \text{ mm}$; chcąc jednak uzyskać bezpośrednio współrzędne terenowe (**w metrach !**), wyliczono „terenowe” współrzędne znaczków tłowych – w płaszczyźnie mierzonej liny; wprowadzamy je – przy orientacji wewnętrznej - jako współrzędne znaczków tłowych:

100: -37,456 13,812 **200:** 0,000 40,101 (na kropce!) **300:** 37,181 13,802 **400:** 0,000 -12,584

„Terenowe” współrzędne znaczków tłowych zostały wyliczone jako płaskie współrzędne ekwiwalentne. Po orientacji wewnętrznej, wykonujemy pomiar współrzędnych X i Z [**w metrach !**] 8-9 równomiernie rozmieszczonych punktów liny, po czym wykonujemy obliczenia – jak poprzednio – programem GEOCATEN. Zapis wyników – jak poprzednio, lub wydruk.

Problemy: jak byśmy postępowali, gdyby zdjęcie było równoległe do liny? Sprawdź na kalkulatorze poprawność obliczenia „terenowych współrzędnych znaczków tłowych” (dane z pomiaru komina, dla $c_k = 195,77\text{mm}$) Porównaj wyniki uzyskane obiema metodami.

6.5. Wyznaczanie odchyłek projektowych chłodni kominowych

Celem pomiaru jest określenie odchyłek powłoki mierzonej chłodni od projektowej hiperboloidy obrotowej. Niestaranności wykonawstwa budowlanego, czy też odkształcenia budowli (wykazane pomiarowo jako odchyłki od kształtu projektowego), przekraczające wartości dopuszczalne, zagrażają stateczności i bezpiecznej eksploatacji budowli.

Wyznaczone zostaną – fotogrametrycznym wcięciem w przód – współrzędne X, Y, Z, a następnie – odchyłki od projektowej hipربولoidy obrotowej.

Pomiar na VSD (pliki: 01.tif, 03.tif, 05.tif, 07.tif)

Na dwóch zdjęciach mierzy się współrzędne tłowe 2 centralnie położonych punktów kontrolnych (objaśnienie na odbitce fotograficznej), oraz punktów kontrolowanych na wskazanym przez prowadzącego „południku” (np. na „południku” nr.15: 1510, 1520, 1530 ...1590 (najniższy – 1510). **Uwaga:** „środek krzyża” nie stanowi wystarczająco precyzyjnej definicji przy pomiarze dużego elementu odfotografowanego perspektywnie; jako „punkt kontrolowany” będziemy więc traktować lewy, górny narożnik krzyża.

Każda osoba ma „własny” południk do pomiaru, ale w dwójce najlepiej jest, aby każdy wykonał całość pomiaru współrzędnych tłowych (x i z) na jednym ze zdjęć. Wyniki rejestrujemy. Dane do orientacji wewnętrznej jak przy pomiarze komina, $c_k = 194,92$ mm.

Wyniki pomiaru należy z grubsza sprawdzić pomiarem linijką na odbitce fotograficznej

Obliczenia azymutów osi kamer oraz poprawek: Δz_o i ω

Oblicza się azymut średni osi kamery (odejmując od azymutów kierunków do punktów kontrolnych ich kąty γ - obliczone ze współrzędnych tłowych); przed przystąpieniem do dalszych obliczeń komputerowych, obliczony azymut należy sprawdzić u prowadzącego.

W celu wyznaczenia poprawek: Δz_o - do współrzędnej punktu głównego i ω - do kąta nachylenia kamery (nominalnie równego zeru), zestawia się dwa równania – dla dwóch punktów kontrolnych: górnego i dolnego:

$$z - \Delta z_o + c_k \left(1 + \frac{z^2}{c_k^2} \right) \omega = Z_f \frac{c_k}{d \cos \gamma} \quad , \quad \text{gdzie } Z_f = Z - Z_o, \quad \gamma = \arctg \frac{x}{c_k} \quad , \quad d - \text{odległość.}$$

Organizacyjnie: każdy liczy samodzielnie poprawki i azymut osi kamery dla jednego ze zdjęć; poprawki do drugiego może przyjąć od kogoś innego.

Obliczenia współrzędnych terenowych i odchyłek projektowych

Do obliczenia współrzędnych punktów kontrolowanych a następnie odchyłek projektowych wykorzystuje się programy MODSYM i CHŁODNIE (W. Mierzwy).

Pliki wejściowe: **zdl.txt** (lewe zdj.) i **zdjp.txt** (prawe zdj.) redaguje się następująco:

```
194.92 0.0 ..... (ck, xo = 0, Δzo – obliczone; [mm] )
..... ..... (Yo, Xo, Zo – współ. stanowiska; [m] )
..... ..... 0.0 (φ = 400g – azymut osi kamery, ω - obliczone, κ = 0 ; wszystko w gradach)
.. ..
.
.
.. ..
0 0.0 0.0
```

Liczenie **współrzędnych modelu** programem MODSYM; wyniki: **wspmod.txt**, oraz **mod.txt**. Należy sprawdzić, czy wartości odchyłek Q w zbiorze wyników **wspmod.txt** są dostatecznie małe. Redakcja zbioru **mod.txt** – przez dopisanie zer na dole (cztery). Przeredagowany plik **mod.txt** należy przemianować (pierwsze 3 litery nazwiska) – jako zbiór

danych do obliczeń **odchyłek projektowych** programem CHŁODNIE ; uwaga: licząc tym programem, **nazwę pliku należy podać w apostrofach: ‘’**; na stawiane pytania odpowiadać: nie (0). Wyniki: **wspbieg.txt** – odchyłki **dr**. Należy wydrukować **wspmod.txt, wspbieg.txt**. Opracowanie graficzne – prezentacja odchyłek (dr) na poszczególnych wysokościach (od teoretycznej hiperboli, reprezentowanej na wykresie przez pionową odciętą „Z”).

DANE: zestawienie współrzędnych punktów kontrolnych i stanowisk kamer

Nr stan. Nr zdj. Współrzędne stanowisk (środków rzutów) [m]

		X_0	Y_0	Z_0
1	1	499,968	500,100	11,731
3	3	619,518	823,749	15,393
5	5	299,412	967,840	9,168
7	7	200,664	649,873	19,111

Nr p-u kontrol.	Lokalizacja p-u kontr.	X	Y	Z	Nr p-u
12	między pionami	436,098	744,404	120,088	12
22	3 i 4	446,174	754,283	19,422	22
14	obok pionu 10	395,564	740,630	120,054	14
24		383,874	750,000	19,408	24
15	obok pionu 13	388,081	719,336	120,034	15
25		373,146	717,656	19,510	25
17	między pionami	418,896	692,236	120,078	17
27	19 i 20	420,238	677,406	19,973	27

Objaśnienia numeracji punktów kontrolnych: 12, 14, 15, 17 na górze chłodni; 22...27 na dole chłodni.

Numery „południków”: 1 - 25; numery poziomów: 10 (najniższy), 20...90 (są to numery „betonowań”). Numeracja punktów kontrolowanych (przykładowo): nr 1920 oznacza - 19 południk, 20 poziom.

Wysokości poziomów numerowanych 10 ... 90 - w układzie hiperboloidy (do wykresu):

90	10,90m	60	- 25,00m	30	-60,30m
80	-1,10m	50	-35,90m	20	-71,60m
70	-13,15m	40	-48,60m	10	-82,90m

Dane (do rozdziału między wykonawców ćwiczenia):

Para zdjęć: 1 (prawe) – 3 (lewe) 3 (p) – 5 (l) 5 (p) – 7(l) 7 (p) – 1 (l)
 Południki: 23, 24, 25 4, 5, 6, 7 11, 12, 13 16, 17, 18
 P-ty kontrolne: **zdj.1:** 17 i 27 lub 18 i 28, **zdj.3:** 12 i 22, **zdj.5:** 14 i 24, **zdj.7:** 15 i 25

Problemy: jakie rozwiązanie analityczne było by niezbędne w przypadku zastosowania metody cyfrowej (kamera niemetryczna !); jaką alternatywną metodę pomiaru chłodni zastosować, jak zaprojektować punkty kontrolne ?

6.6. Pomiar wychylenia i zmiany wychylenia słupa

Celem pomiaru jest określenie składowych wychylenia aktualnego, oraz okresowego przyrostu wychylenia słupa. Dane są poziome zdjęcia wykonane kamerą Photho z dwóch stanowisk (1 i 2) w dwóch różnych terminach; łącznie 4 fotogramy. Znane są współrzędne stanowisk i słupa.

Pomiar pseudostereogramów: na lewy nośnik zakłada się zdjęcie aktualne (o wyższym numerze), na prawy wcześniejsze. Zdjęcia zestraja się na znaczki pionowe, odczytuje paralaksy podłużne na znaczkach „200” i „400” (do 0,001mm) i mierzy wychylenie słupa na możliwie dużym odcinku, celując na punkty jednej lub obu krawędzi, na górze i na dole. Nie jest - tym razem - konieczny pomiar tego samego fragmentu słupa na obydwu stanowiskach. Mierzając przyrost wychylenia - wyrażony różnicą odczytów „p” na punkcie górnym (g) i dolnym (d) - najważniejsze jest, aby na obu zdjęciach wycelować na ten sam punkt, a ponieważ kontur słupa nie zawiera zbyt wielu elementów ułatwiających to, więc należy najpierw usunąć paraleksę poprzeczną (q) na najbliższym szczególe słupa a potem dopiero mierzyć „p”. Liczymy różnice: $\Delta x = x_g - x_d$, $dx = p_g - p_d$ i podobnie Δz . Jako obserwacje - w tym przypadku - traktujemy ilorazy: $\Delta x[\mu m]:\Delta z[mm]$ - jako wychylenie aktualne, oraz $dx[\mu m]:\Delta z[mm]$ jako okresowy przyrost wychylenia (na zdjęciach) wyrażony w promillach.

Obliczenia wychyleń względnych (aktualne i okresowy przyrost) wykonuje się według poniższych wzorów macierzowych (modyfikacja wzoru 4.10). Każdy student liczy własną macierz transformującą **T** różnicując indywidualną współrzędną Y (odczytaną z podanego szkicu), według regułki: $Y_{indw.} = Y_{stupa} + n_{indw.} * 0,1m$, uwzględniając współrzędne stanowisk: $X_1 = -11,16$, $Y_1 = -38,10$, $X_2 = 74,86$, $Y_2 = -41,80$.

$$\begin{matrix} x & & T & & l \\ \left[\begin{array}{c} \frac{dX}{\Delta Z} \\ \frac{dY}{\Delta Z} \end{array} \right] & = & \left[\begin{array}{cc} \frac{\Delta X_2 d_1 \cos \gamma_1}{b} & \frac{-\Delta X_1 d_2 \cos \gamma_2}{b} \\ \frac{\Delta Y_2 d_1 \cos \gamma_1}{b} & \frac{-\Delta Y_1 d_2 \cos \gamma_2}{b} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \frac{dx_1}{\Delta z_1} \\ \frac{dx_2}{\Delta z_2} \end{array} \right] \end{matrix}$$

gdzie: $b = \Delta X_1 \Delta Y_2 - \Delta X_2 \Delta Y_1$, $\Delta X_1 = X_P - X_{st.1}$, ..., $\Delta Y_2 = Y_P - X_{st.2}$

Pytania i problemy: zauważ, że w przypadku obliczania wychyleń względnych (i ich zmian) zbędna jest znajomość wartości c_k , która występuje w podobnych wzorach służących do obliczania wychyleń (i ich zmian).

6.8. Pomiar przekroji podziemnych zarejestrowanych cyfrowo metodą „płaszczyzny światła”

Wstęp

Pomiar przekrojów poprzecznych wyrobisk górniczych, tuneli, czy szybów towarzyszy budowie i eksploatacji wymienionych budowli. Celem jest określenie kształtu i wymiarów, pozwalających wyznaczyć odchyłki projektowe drażonego wyrobiska lub tunelu, bądź obliczyć objętość urobku.

Pomiary przekroju poprzecznego wyrobiska można wykonywać metodami geodezyjnymi, za pomocą bezpośrednich pomiarów liniowych (np. rzędnych i odciętych, wcięć liniowych, biegunowo w płaszczyźnie przekroju). Obok metod geodezyjnych, przy pomiarach wielu obiektów inżynierskich, stosuje się często metodę fotogrametryczną.

Istota fotogrametrycznej metody wykorzystującej „płaszczyzny światła” polega na wykonaniu zdjęcia śladu przekroju, jaki powstaje w wyniku krótkotrwałego oświetlenia wyrobiska płaszczyzną światła emitowaną przez elektryczne urządzenie oświetleniowe. Urządzenie

oświetlające (rzutujące „płaszczyznę światła”) jest zorientowane prostopadle względem osi wyrobiska. Prace terenowe sprowadzają się więc do wykonania zdjęć przekroju wyrobiska kamerą fotograficzną; odfotografowana zostaje również czwórka punktów stanowiących podstawę transformacji rzutowej. Zasada metody jest opisana w rozdziale 5.1.2.

Ćwiczenie

I. Przygotowanie danych:

Dane potrzebne do wykonania ćwiczenia:

- Obraz cyfrowy:
 - wykonany aparatem cyfrowym:* - Kodak DC260;
 - format pliku:* - JPEG przetworzony do TIF;
 - obiekt* - tunel drogowy – Nowa Huta,
 - data wykonania:* - czerwiec 2003r.
- Przekrój teoretyczny – dany z pomiarów geodezyjnych:
 - metoda pomiarów terenowych:* - tachimetria;
 - format danych:* - DGN.
- Dane niezbędne do transformacji do układu terenowego:
 - rodzaj transformacji:* - transformacja rzutowa;
 - ilość punktów do transf.:* - 4 odfotografowane na zdjęciu sygnały o znanych współrzędnych (X, Y, Z)

- A. Utworzyć katalog roboczy:
D:_Nazwisko_Prowadzacego\Nazwisko_Studenta\Przekroje;
- B. Przekopiować do swojego katalogu roboczego zawartość katalogu:
D:_Nazwisko_Prowadzacego \Rok.

II. Wykonanie ćwiczenia:

A. Transformacja obrazu cyfrowego do układu terenowego:

- uruchomić program **IRAS C** i otworzyć plik **PROFIL.DGN**;
- wyedytować kolejne warstwy:
(USTAWIENIA → WARSTWA → WYŚWIETL lub CTRL + E):
 - 1** – punkty z pomiarów terenowych;
 - 5** – numery punktów;
 - 10** – przekrój wykonany na podstawie pomiarów terenowych;
 - 20** – punkty dostosowania;
- ukryć wszystkie warstwy, warstwę numer **20** ustawić jako **aktywną** we wszystkich widokach;
- otworzyć plik obrazu z zarejestrowanym przekrojem (**interaktywnie**):
IRAS C → FILE → OPEN → 100.TIF;
- wykonać transformację układu obrazu do układu terenowego:
IRAS C → GEOMETRY → IMAGE TO MAP;
 - a. rodzaj transformacji: **RZUTOWA (PROJECTIVE)**;
 - b. liczba punktów dostosowania: **4 odfotografowane na zdjęciu sygnały**;
 - c. mierząc punkty do transformacji należy zachować następującą kolejność: wskazać punkt w układzie docelowym (naroże ramki) w oknie **3**, pomierzyć punkt w oknie **2**, następnie wskazać

odpowiadający mu punkt w układzie zdjęcia (świecący sygnał) w oknie 4, pomierzyć punkt w oknie 1.

B. Wektoryzacja profilu na obrazie cyfrowym.

- edycja warstwy, na której zapisano profil zwektoryzowany na podstawie pomiarów terenowych: **CTRL+E → WARSTWY nr 1 i 10**;
- wektoryzacja przekroju widocznego na obrazie cyfrowym jako smuga światła;
- z wykorzystaniem funkcji „mierz odległość” z opcją **prostopadle**, należy pomierzyć różnice w przekroju przyjętym jako teoretyczny i zwektoryzowanym, w punktach znajdujących się na warstwie 1.

III. Opracowanie wyników:

A. Sprawozdanie techniczne.

B. Postać tabelaryczna zawierająca kolejne punkty i pomierzone odchyłki w każdym punkcie.

C. Wykres zmian odchyłek dla kolejnych punktów w kierunku od lewej do prawej strony profilu.

6.9. Określanie objętości mas skalnych

Pomiar objętości mas można przeprowadzić różnymi metodami (np. geodezyjną, fotogrametryczną). Jedną z popularniejszych metod geodezyjnych polega na wykreśleniu profilu podłużnego i przekrojów poprzecznych, przy czym pomiar wymaga stabilizacji punktów na badanym terenie, co w wielu przypadkach może być problemem. Z reguły metody geodezyjne wiążą się z koniecznością pomiaru bezpośredniego, co nie zawsze jest możliwe, lub co najmniej utrudnione. Przewagę mają tu techniki fotogrametryczne, które nie wymagają pomiaru terenowego badanych punktów, a które można podzielić następująco:

- metoda graficzna,
- instrumentalno-graficzna,
- numeryczna,
- analityczna.

Szczegóły można znaleźć w literaturze [Sitek, 1991].

W ćwiczeniu zostanie wykorzystana metoda numeryczna, polegająca na automatycznym rejestrowaniu mierzonych punktów do NMT. Metoda ta pozwala na gromadzenie danych pozwalających utworzyć numeryczny model terenu. Mając dwa stany (pierwotny i wtórny), oraz ich numeryczny model, możemy wyznaczyć różnicę pomiędzy nimi - co da nam szukaną objętość mas.

Celem ćwiczenia jest określenie objętości mas skalnych, będących wynikiem odstrzału w kamieniołomie „Bobrowniki”. Wykonane zostały zdjęcia normalne w dwóch stanach (przed i po odstrzale). Stała użytej kamery Photheo 19/1318 $c_k = 193,76$ mm; baza fotografowania wynosiła 70,455m. Znane są współrzędne terenowe stanowisk, oraz 6 punktów kontrolnych zaznaczonych na odbitkach (w układzie fotogrametrycznym).

Wykaz współrzędnych

Nr p.	X [m]	Y [m]	Z [m]
-------	-------	-------	-------

A – prawe st.	70,455	0,00	99,10
B - lewe st.	0,00	0,00	100,00
1	44,56	206,96	60,28
2	8,53	197,89	59,43
3	-20,06	190,70	59,20
4	29,51	326,33	77,49
5	-0,07	311,98	77,96
6	-31,29	296,86	77,98

Dla określenia objętości stanowiącej cel ćwiczenia porównane zostaną objętości:

- pierwotna (określona na podstawie pomiaru stanu pierwszego – I),
- wtórna (określona na podstawie stereogramu przedstawiającego stan II).

Do określenia objętości zostanie wykorzystana metoda fotogrametryczna polegająca na budowie numerycznego modelu terenu, a następnie określeniu objętości dla obu zdefiniowanych mas skalnych. Pomiar NMT zostanie przeprowadzony na fotogrametrycznej stacji cyfrowej VSD-AGH.

Ćwiczenie wykonuje się dwójkami (pierwsza osoba mierzy stan I, druga II).

Ćwiczenie

I. Przygotowanie danych:

Na serwerze Photos w katalogu **Public\Dydaktyka\Dane** znajdują się katalogi: \1 i \2 z dwoma stanami odkrywki (katalog \1 - stan pierwszy, katalog \2 - stan drugi). Katalog 1 oraz 2 zawiera obrazy 1l.tif i 1p.tif oraz 2l.tif i 2p.tif oraz ich piramidy (pliki *.tff). Pliki należy skopiować do swojego katalogu na dysk lokalny d:\Tify.

- na dysku **d:_Nazwisko_Prowadzącego\Nazwisko_studenta\Dane**, założyć podkatalogi: \1 i \2 ,
- do tych katalogów skopiować z **Public\Dydaktyka\Dane\Orientacja** plik „1.pkt”,
- kopiując go katalogu \2 należy zmienić mu nazwę na „2.pkt”,
- z katalogu VSD skopiować do nich plik „vsd.bat” i uruchomić go,
- założyć nowy projekt o nazwie „1” (lub „2” – w zależności od mierzonego stanu).

II. Wykonanie ćwiczenia:

A. Wykonanie orientacji:

- wewnętrzna (transformacja biliniowa) – klawisz „i” i wczytanie współrzędnych poprzez klawisz ‘insert’, numeracja znaczków: 1-lewy, 2-górny, 3-prawy, 4-dolny,
- wzajemna (dopuszczalna paralaksa szczątkowa max. 0,5 piksela),
- bezwzględna – wykorzystać slajdy umieszczone w katalogu **Public\Dydaktyka\Dane\Orientacja**. Slajdy z punktami do orientacji bezwzględnej oznaczone są numerami od 101.tif do 107.tif .Plik przeglądowy z punktami nosi nazwę widok.tif.

- B. Po wykonaniu orientacji, przygotować plik wektorowy obejmujący zakres opracowania (poprzez wektoryzację na modelu).
- C. Po wczytaniu pliku wektorowego, przystąpić do stawiania pikiet. Proponuję się stawiać je na obrzeżach obszaru oraz jako punkty profili (wybrać około 2-3 profili). W przypadku nieciągłości - dołożyć pikiety.
- D. Na końcu pliku z rozszerzeniem *.or znajdują się współrzędne terenowe tych pikiet (numer pikiet, współrzędne: X Y Z). Należy je skopiować do nowego pliku. Tak przygotowany plik wczytać do programu „Surfer” poprzez opcję „Data” z menu „Grid” (*przy wczytaniu uwaga na definicję osi !!!*). Z menu „Map” wybrać opcję „Wireframe” oraz „Contour Map” celem wizualizacji danych. Następnie z menu „Grid” opcja „Volume” pozwala wyliczyć objętość szukanej bryły.

Spośród proponowanych przez oprogramowanie „Surfer” możliwości interpolacji siatki GRID, w praktyce stosuje się głównie dwie metody:

- triangulacji (triangulation /linear interpolation),
- kriging.

W przypadku powierzchni bardziej regularnych należy stosować metodę „kriging”. Dla powierzchni, gdzie ta regularność jest zaburzona gwałtownymi uskokami terenu należy, należy stosować metodę triangulacji, polegającą na łączeniu wszystkich punktów w siatkę trójkątów i interpolacji między nimi, przy czym wartości pikiet po interpolacji zostają zachowane. W przypadku metody „kriging” wygładzenie powierzchni wynikające z zastosowanej funkcji może zmieniać wartość współrzędnej „z” mierzonych punktach, celem bardziej „gładkiego” wpasowania.

W ćwiczeniu (z racji specyfiki obiektu) należy zastosować metodę triangulacji.

- E. Analogicznie dla projektu 2. Po zakończeniu tych operacji od objętości 1 odjąć 2 i otrzymany wynik podać w sprawozdaniu.

III. Opracowanie wyników:

- A. Sprawozdanie techniczne,
- B. Wydruki z programu „Surfer” opcji „Wireframe” oraz „Contour Map” z naniesionym rozmieszczeniem pikiet (pamiętać o zachowaniu o skali !!!),
- C. Wydruk plików z programu „Surfer” – opcja „Volume” dla obu stanów z obliczona różnicą objętości, będącą wynikiem końcowym ćwiczenia.