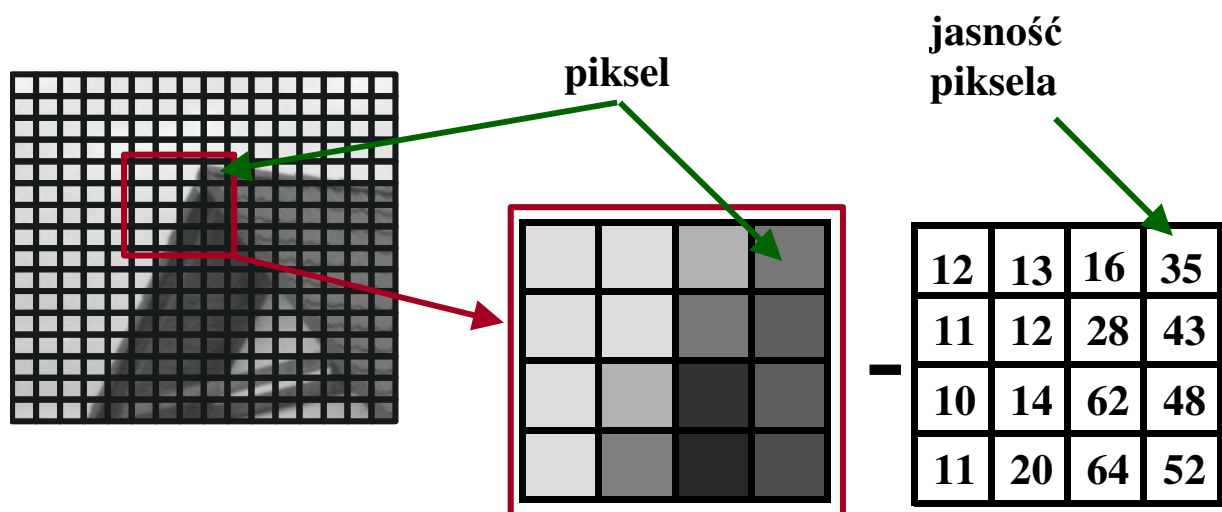


## FOTOGRAMETRIA

### 1. Sposoby pozyskania i zapisu obrazów stosowanych w fotogrametrii i teledetekcji

#### 1.1 Obrazy cyfrowe i sposób ich zapisu

Zdjęcie fotograficzne, obraz namalowany przez malarza, rysunek na papierze itp. ... są to obrazy w postaci analogowej. Zapis takiego obrazu w pamięci komputera wymaga przetworzenia go na postać cyfrową. Polega to na podzieleniu obrazu na regularną siatkę kwadratów. Jeden taki kwadrat jest to najmniejszy element obrazu zwany pikselem. Jasność obrazu czarno białego w ramach piksela zostaje uśredniona. W zapisie cyfrowym dla piksela zapisuje się jego średnią jasność jako liczbę. Dla zmniejszenia ilości potrzebnej pamięci oraz przyśpieszenia przetwarzania obrazu jasność zapisuje się za pomocą liczb całkowitych, a nie rzeczywistych.



Rys. 1.1 Zasada tworzenia obrazu cyfrowego

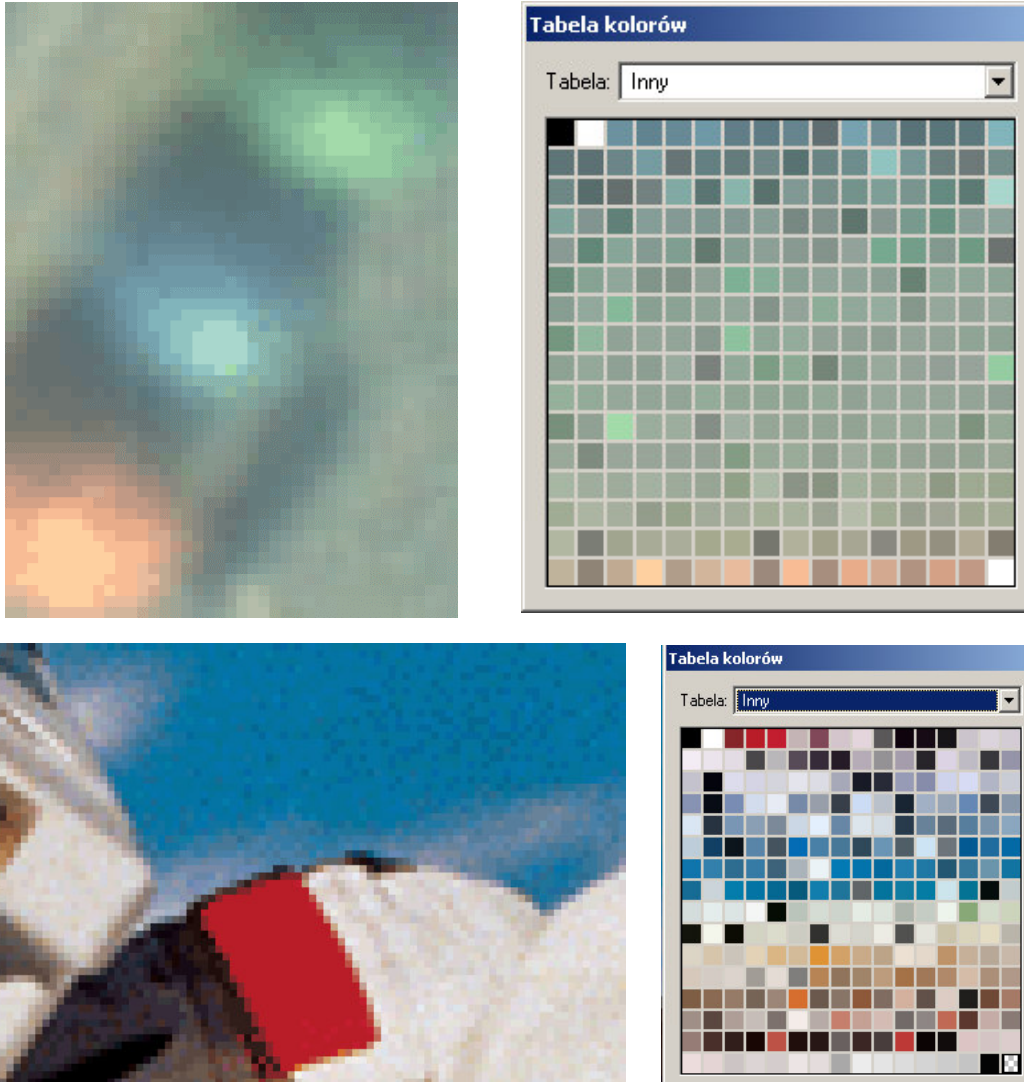
W rzeczywistości obraz cyfrowy zapisany w pamięci komputera nie zawsze ma postać macierzy jak na rys. 1.1. Stosowane są różne formaty zapisu i różne metody kompresji zapisanego obrazu. Kompresje mogą być bezstratne (np. LZW) gdy zmniejszenie objętości pliku nie powoduje straty jakości obrazu, oraz stratne (np. JPEG) czyli takie w których następuje pogorszenie jakości obrazu po skompresowaniu.

Jakość obrazu cyfrowego określa się zazwyczaj za pomocą dwu podstawowych parametrów:

- Rozdzielczość geometryczna - podawana przeważnie w jednostkach „dpi” czyli ilości pikseli w linii obrazu na długości jednego cala
- Rozdzielczość radiometryczna - czyli z jaką dokładnością podaje się jasność piksela. Zależy ona od ilości bitów przeznaczonych na zapis liczby określającej jasność. Najczęściej wykorzystuje się osiem bitów, czyli jeden bajt, co daje 256 stopni jasności, czasem cztery bity co daje 16 stopni jasności, natomiast w niektórych profesjonalnych zastosowaniach dziesięć, dwanaście lub więcej bitów.

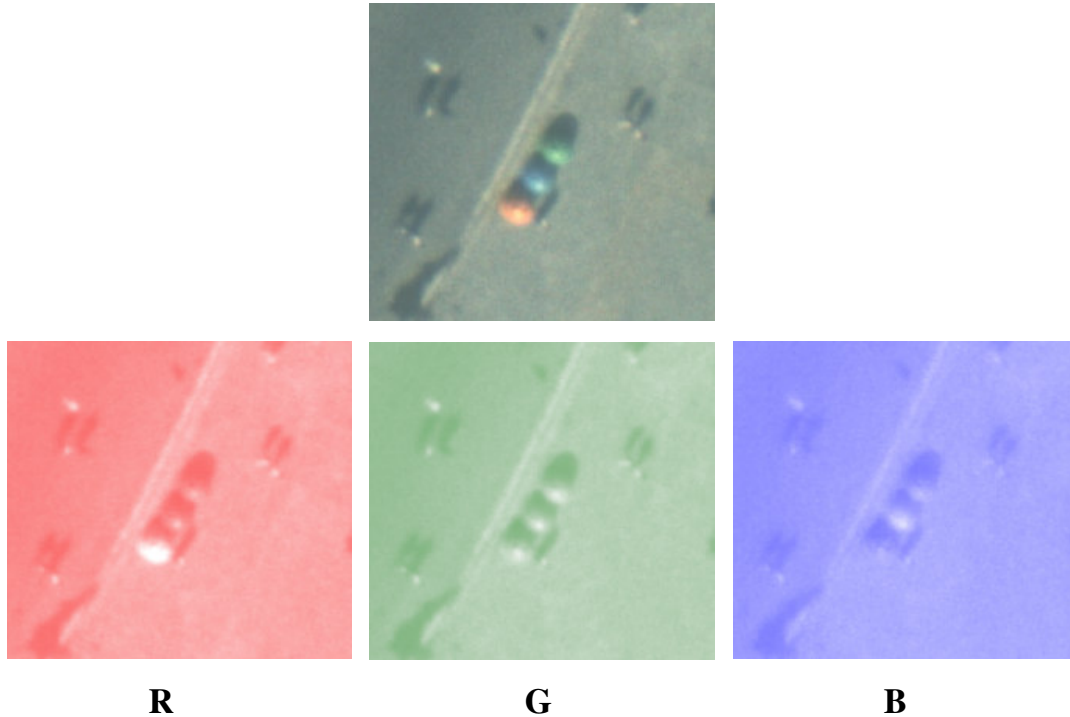
Obraz kolorowy zapisuje się na dwa sposoby.

Pierwszy sposób - nazywany często „kolor indeksowany” - polega na tym, że poszczególne kolory mają swoje numery i ten numer zapisuje się w pamięci komputera. Zapis za pomocą ośmiu bitów daje możliwość ukazania 256 kolorów, natomiast zapis za pomocą czterech bitów tylko 16 kolorów.



Rys. 1.2 Fragment obrazu zapisanego jako kolor indeksowany oraz tabela kolorów

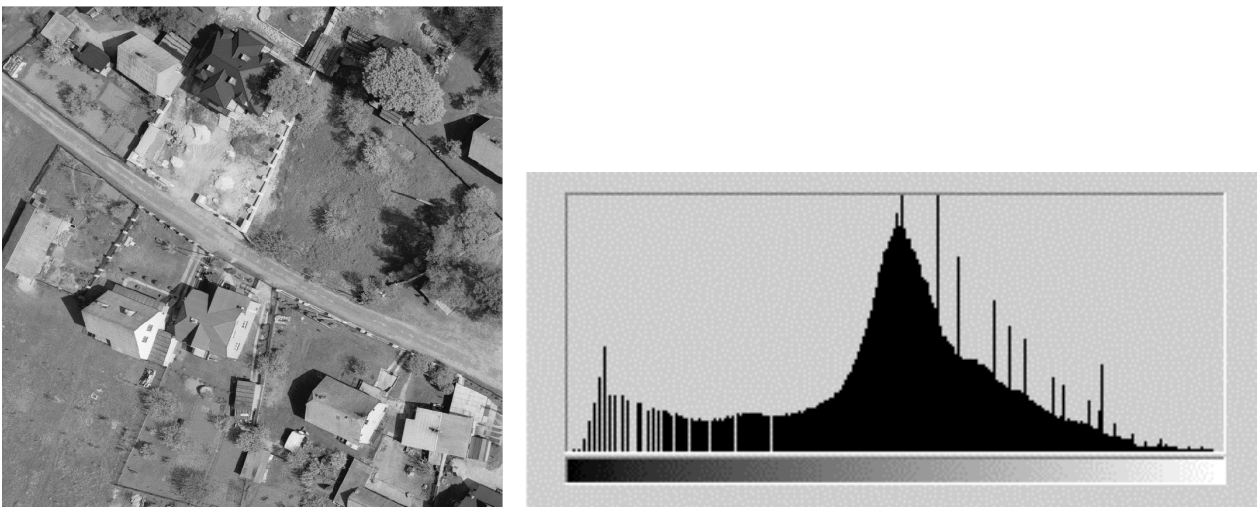
Drugi sposób polega na rozbiciu obrazu na kilka obrazów w kolorach podstawowych. W zależności od przyjętego zestawu kolorów podstawowych mamy różne systemy np. RGB - kolory: czerwony, zielony, niebieski; CMYK - kolory: cyan, magenta, żółty, czarny. W pamięci komputera zapisuje się wówczas dla jednego obrazu - de facto kilka obrazów składowych, a w każdym obrazie składowym jasności danego koloru podstawowego. Jeśli dla obrazu kolorowego w systemie RGB jasność każdego obrazu składowego zapiszemy za pomocą ośmiu bitów otrzymamy około 16.7 mln. odcieni kolorów.



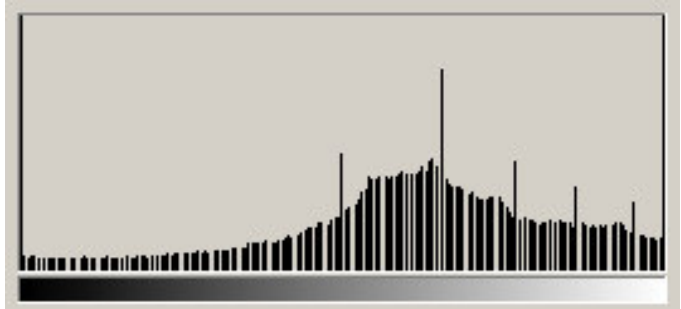
Rys. 1.3 Obraz kolorowy zapisany w systemie RGB oraz obrazy składowe w kolorach podstawowych

## 1.2 Histogram obrazu cyfrowego

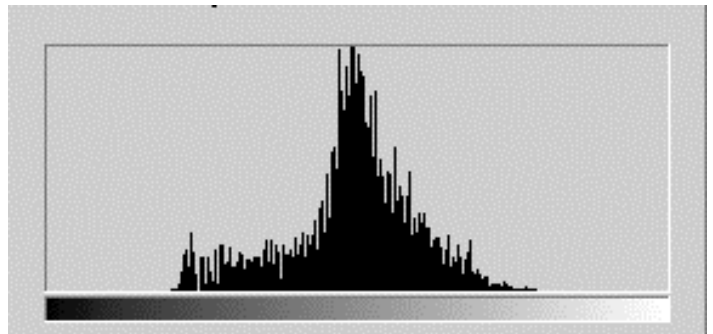
Histogram obrazu jest to wykres przedstawiający ilość pikseli o określonej jasności. Na podstawie histogramu można określić pewne cechy obrazu. Obraz o dobrej jakości radiometrycznej powinien posiadać histogram w miarę wyrównany (oczywiście w zależności od fotografowanego obiektu) a jasności pikseli powinny się zawierać od wartości zero lub prawie zero do wartości prawie maksymalnej (zależnej od przyjętej ilości bitów na zapis np. dla jednego bajta maksymalna wartość wynosi 255).



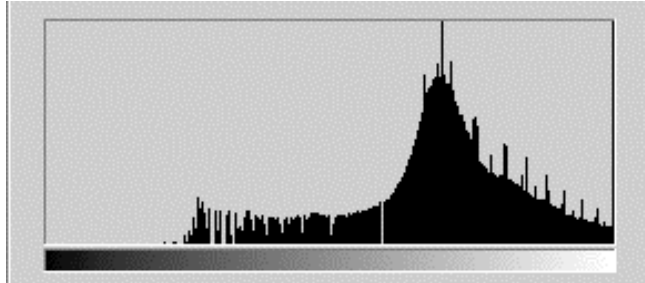
rys. 1.4. Histogram obrazu o średnim kontraście



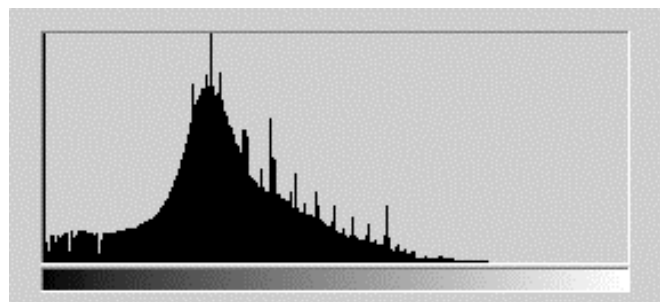
Rys. 1.5. Histogram obrazu kontrastowego (histogram jest bardzo wyrównany)



Rys. 1.6. Histogram obrazu o małym kontraście (histogram ma obcięte tony bardzo jasne i bardzo ciemne)



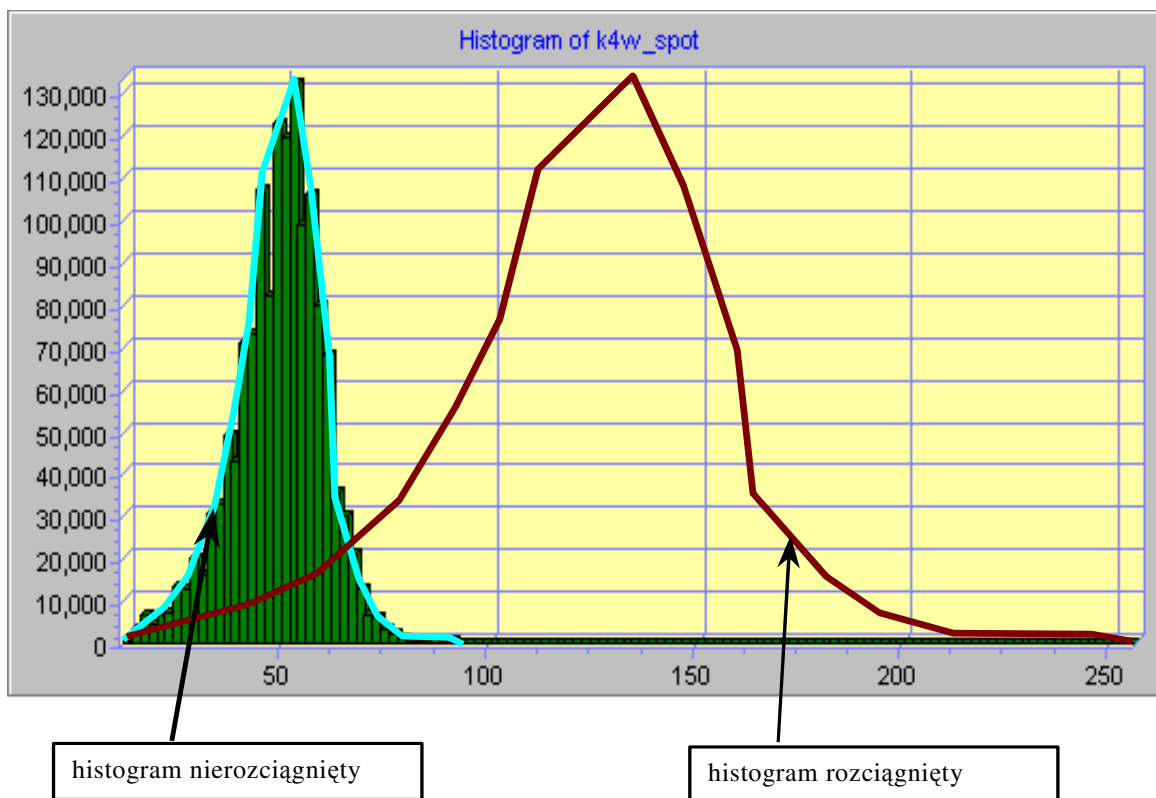
Rys. 1.7 .Histogram obrazu jasnego (obcięte są tony ciemne - porównaj z rys. 1.4)



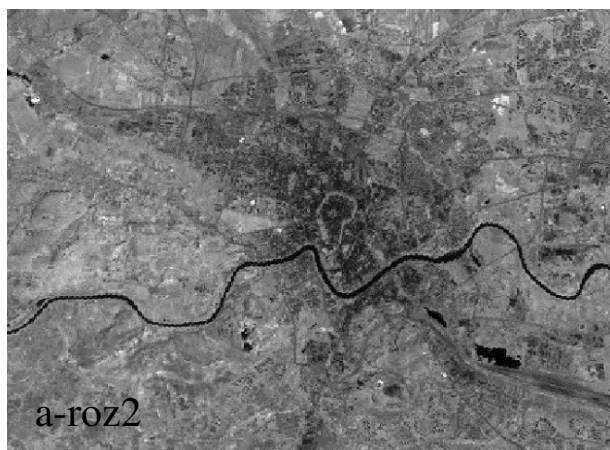
Rys. 1.8. Histogram obrazu ciemnego (obcięte są tony jasne - porównaj z rys. 1.4)

Jeżeli histogram obrazu wskazuje, że nie wykorzystano skrajnych jasności w obrazie (tonów bardzo ciemnych lub bardzo jasnych) można dokonać operacji „rozciągnięcia histogramu”. Rozciągnięcie histogramu powoduje zmianę jasności pikseli wg. jakiejś funkcji np. liniowej, wykładniczej lub logarytmicznej. Przykład: przy rozciągnięciu liniowym o współczynniku dwa razy – piksele o jasności różniące się o jeden będą różniły się o dwa. Spowoduje to wykorzystanie w obrazie wszystkich możliwych wartości jasności, a zatem poprawi rozróżnialność elementów obrazu. Trzeba jednak powiedzieć, że operacja ta nie umożliwia ukazania w obrazie informacji, których przed rozciągnięciem histogramu tam nie było, umożliwia jedynie wyraźniejsze ukazanie różnic pomiędzy poszczególnymi pikselami.

Operacja rozciągnięcia histogramu jest często stosowana przy obróbce obrazów satelitarnych. Ponieważ sensor w satelicie ma tak ustawione parametry obrazowania, aby można było zarejestrować wszystkie skrajności, jasności pikseli typowego obrazu satelitarnego nie wykorzystują wszystkich możliwych wartości.



Rys. 1.9. Liniowe rozciągnięcie histogramu



Rys. 1. 10. Obraz satelitarny o nierozciągniętym histogramie (po lewej) i o rozciągniętym (po prawej)

## 2. Metody pozyskania obrazów

### 2.1 Zdjęcie fotograficzne

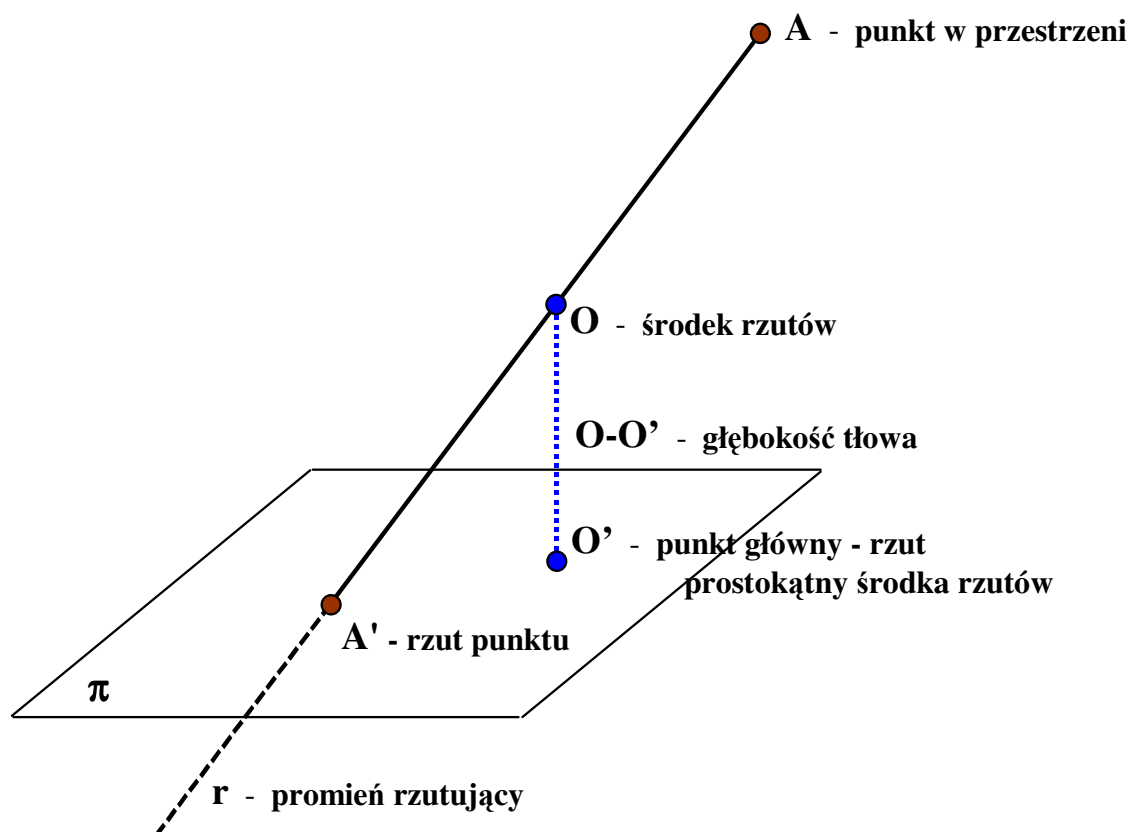
Zdjęcie fotograficzne powstaje w kamerze lub aparacie fotograficznym na specjalnym filmie lub kliszy szklanej pokrytej emulsją światłoczułą. Emulsja ta zawiera światłoczułe związki srebra. Po naświetleniu oraz po chemicznym procesie wywołania powstaje w emulsji obraz utworzony z czarnych kryształków srebra, których ilość jest proporcjonalna do stopnia naświetlenia emulsji. Uzyskany tak obraz jest negatywem fotografowanego obiektu. Odbitkę pozytywową uzyskuje się przez naświetlenie papieru pokrytego emulsją światłoczułą światłem przechodzącym przez negatyw i poddanie procesowi wywołania. Uzyskuje się wówczas negatyw negatywu - czyli pozytyw. Film i papier do wykonywania zdjęć kolorowych zawierają trzy warstwy emulsji czułe na trzy kolory podstawowe.

#### 2.1.1 Rzut środkowy

Matematycznym opisem zdjęcia fotograficznego jest rzut środkowy.

Rzut środkowy polega na przeprowadzeniu promienia rzutującego od danego punktu w przestrzeni poprzez środek rzutów do przecięcia z rzutnią (rys.2.1). Odwzorowanie nie jest wzajemnie jednoznaczne. Jednemu punktowi w przestrzeni ( $A$ ) odpowiada jeden rzut ( $A'$ ), ale jednemu rzutowi ( $A'$ ) odpowiada nieskończona ilość punktów – wszystkie, które leżą na promieniu rzutującym ( $r$ ). Aby odtworzyć przebieg promienia rzutującego należy znać położenie środka rzutów  $O$  względem rzutni. W tym celu wykonuje się rzut prostokątny środka rzutu na rzutnię. Otrzymany punkt  $O'$  nazywa się punktem głównym, a odległość środka rzutu od rzutni (czyli środka rzutów od punktu głównego) nosi nazwę „głębokość tłowa”.

Odtworzenie przebiegu promienia: z punktu głównego  $O'$  wystawia się prostą prostopadłą i na niej odkłada głębokość tłowa. Uzyskuje się w ten sposób środek rzutów  $O$ . Przez środek rzutów  $O$  i przez rzut punktu  $A'$  prowadzi się prostą, która jest poszukiwanym promieniem rzutującym. Ponieważ odwzorowanie nie jest wzajemnie jednoznaczne nie można odtworzyć na tym promieniu położenia punktu  $A$  (nie wiadomo w którym miejscu promienia on się znajduje).

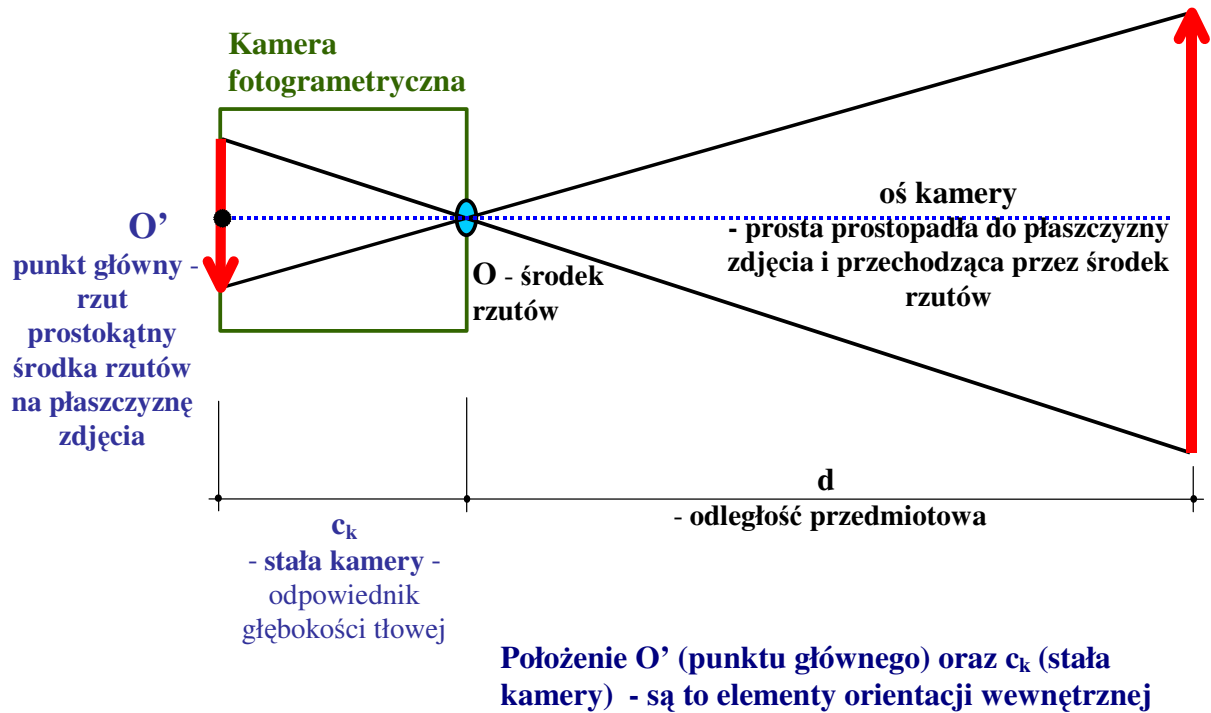


Rys. 2.1 Rzut środkowy punktu

### 2.1.2 Fotografia a rzut środkowy, elementy orientacji wewnętrznej

Fotografia jest niedoskonałą fizyczną realizacją rzutu środkowego. Niedoskonałość fotografii w odzwierciedlaniu rzutu środkowego ma swoje główne źródło w niedoskonałości obiektywu. Błędy obiektywu powodują, iż promienie rzutujące wychodzą z obiektywu pod nieco innym kątem niż wchodzą. Spowodowane tym błędy obrazu zwane są dystorsją (radialną i tangencjalną). W kamerach fotogrametrycznych stosuje się wysokiej jakości obiektywy, tak by błędy dystorsji nie przekroczyły  $5\mu\text{m}$ . Obiektywy gorszej jakości posiadają również inne błędy, ale obiektywy kamer fotogrametrycznych są praktycznie od nich wolne.





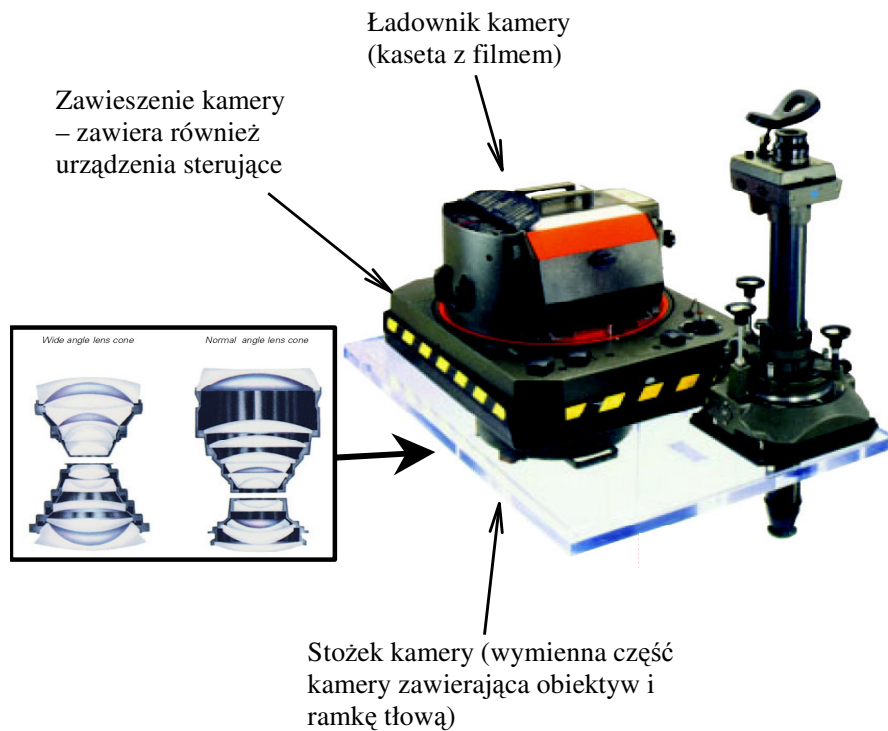
Rys. 2.2 Fotografia - elementy orientacji wewnętrznej kamery fotogrametrycznej

Dodatkowym powodem błędów może być niepłaskość materiału fotograficznego. Aby uniknąć błędów spowodowanych niepłaskością materiału fotograficznego stosuje się klisze szklane, albo film wypłaszcza się przysysając go do płaskiej płyty z otworkami (przez które odciąga się powietrze).

Położenie punktu głównego zdjęcia oraz stała kamery są to elementy orientacji wewnętrznej kamery. Kamery fotogrametryczne są tak budowane, aby zapewnić stałość elementów orientacji wewnętrznej. Jeśli konstrukcja kamery dopuszcza zmienność elementów orientacji wewnętrznej to mogą one przyjmować tylko wybrane wartości (skokowa zmienność) i powinna być zapewniona powtarzalność tych wartości.

Do opracowań fotogrametrycznych wykorzystuje się nieraz zwykłe aparaty fotograficzne, ale dokładność opracowania jest wówczas mniejsza niż gdyby było ono wykonane z wykorzystaniem kamer fotogrametrycznych.

### 2.1.3 Lotnicze kamery fotogrametryczne



Rys. 2.3 Nowoczesna kamera fotogrametryczna na film fotograficzny

Lotnicze kamery fotogrametryczne wykonują zdjęcia przeważnie w formacie 23x23 cm. Obiektywy kamer mają skorygowane większość błędów. Pozostaje jedynie niewielka dystorsja, która nie powoduje błędów większych niż 3-4  $\mu\text{m}$ . Aby uniknąć błędów związanych z niepłaskością filmu jest on na moment wykonania zdjęć przysysany do znajdującej się nad nim płaskiej płytki. Elementy orientacji wewnętrznej kamery (położenie punktu głównego zdjęcia i stałą kamery  $c_k$ ) wyznacza się w procesie kalibracji kamery. W kamerze lotniczej nie można zmieniać wartości stałej kamery (nie można zmieniać ustawienia ostrości obrazu - jest raz ustawiona fabrycznie). Nie jest to potrzebne, ponieważ fotografuje się zawsze z dużej odległości, a w ten sposób została zapewniona stałość elementów orientacji wewnętrznej.

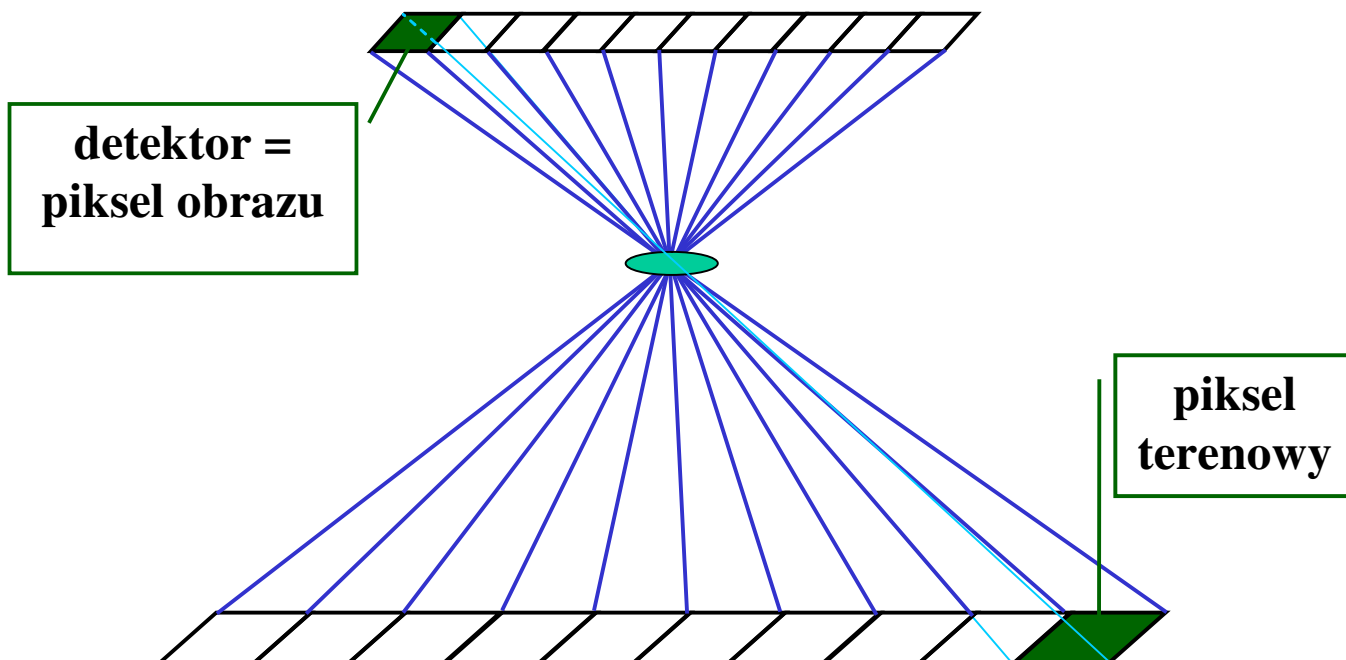
Oprócz tradycyjnych kamer na film fotograficzny ostatnio opracowano nowe modele kamer rejestrujących obraz w postaci cyfrowej. W chwili obecnej (rok 2004) ze względów technicznych jest to rozwiązanie dość drogie.

## 2.2 Skaner

Kamera fotograficzna rejestruje praktycznie w tym samym momencie czasu cały obraz. Zasada działania skanera opiera się na rejestrowaniu obrazu fragment po fragmencie. Promienie świetlne przechodzą przez układ optyczny podobnie jak w przypadku fotografii. Powstający obraz jest rejestrowany za pomocą specjalnych detektorów umieszczonych w płaszczyźnie tłowej. Detektory te pod wpływem promieniowania elektromagnetycznego wytwarzają sygnał

elektryczny.

Pierwotnie był to jeden detektor, a za pomocą ruchomych luster lub wirujących pryzmatów powstający obraz był przesuwany po detektorze. Umożliwiało to zarejestrowanie obrazu punkt po punkcie. Rozwiązanie takie nosiło nazwę skaner optyczno-mechaniczny.

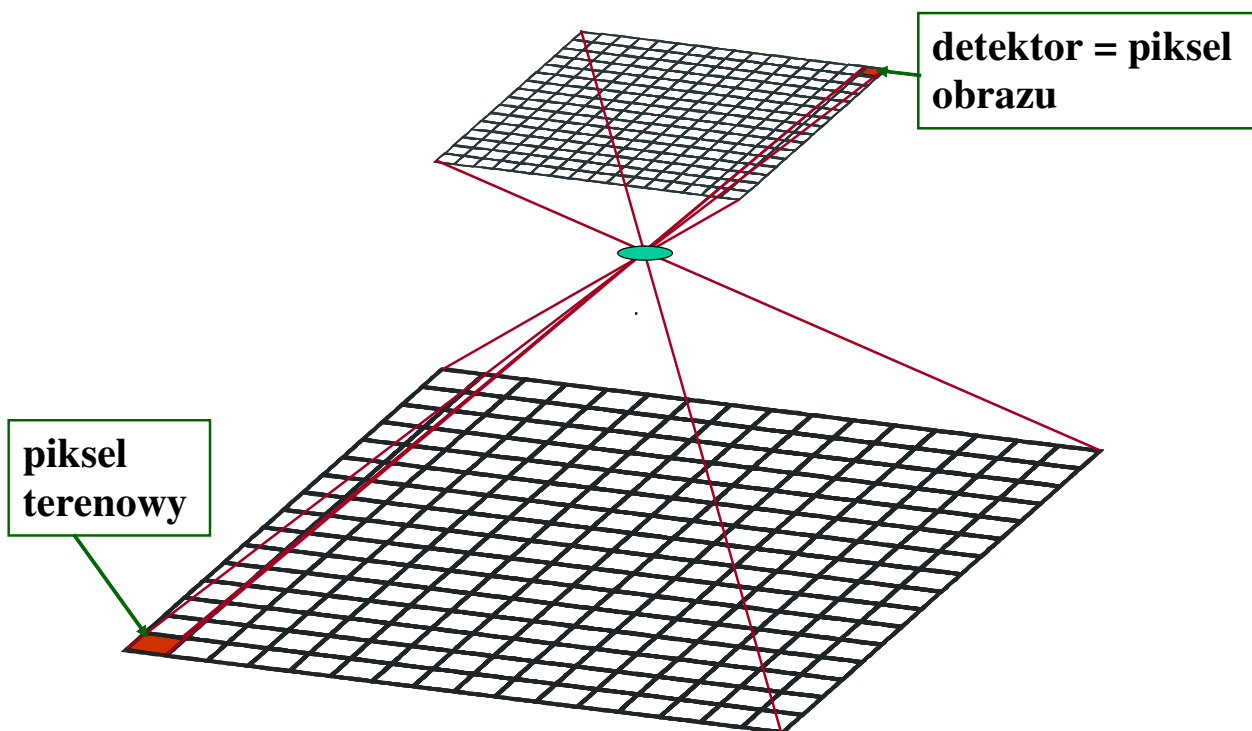


Rys. 2.4 Zasada działania skanera elektrooptycznego

Następnym krokiem było stworzenie skanera elektrooptycznego. W płaszczyźnie tłowej umieszczona jest linijka detektorów (gęsto upakowane detektory ułożone wzdłuż linii prostej) (rys. 2.4). Praktycznie w tym samym momencie czasu szczytywany jest sygnał z tych wszystkich detektorów, czyli rejestrowana jest jedna linia obrazu. Następnie linia detektorów jest przesuwana w kierunku poprzecznym do niej i w ten sposób rejestruje się obraz linia po linii. Przesunięcie linii realizowane jest przez przesunięcie całego skanera (jak w niektórych skanerach satelitarnych) lub przez przesuwanie obrazu po linijce detektorów za pomocą ruchomych luster lub pryzmatów. Sygnał analogowy wytwarzany przez detektory może być zapisywany w postaci analogowej (np. na taśmie magnetycznej) lub zamieniany na postać cyfrową.

## 2.3 Kamera cyfrowa

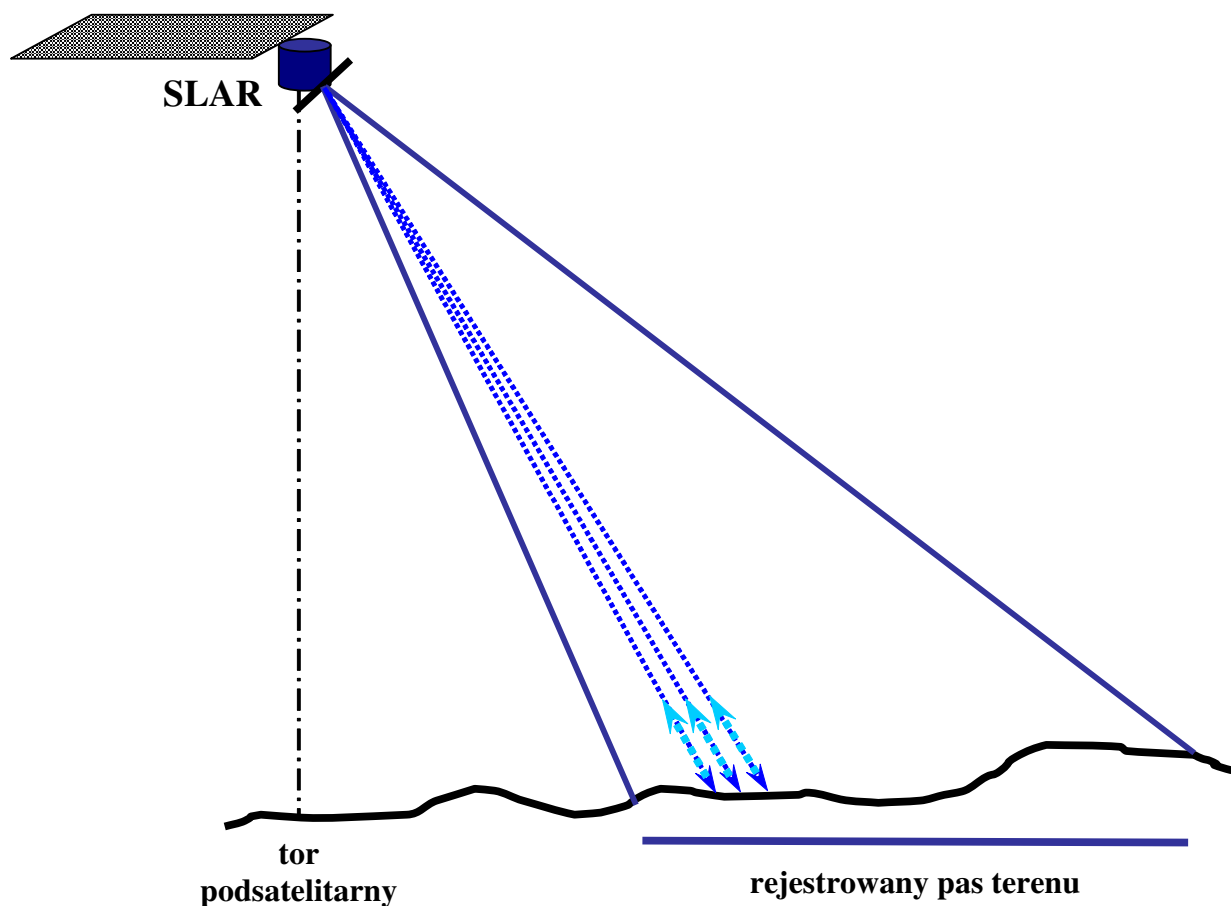
Wykorzystanie liniiki detektorów będzie powodowało błędy obrazu, jeśli rejestrowany jest obiekt ruchomy. Dlatego w kamerach cyfrowych wykorzystuje się matrycę detektorów (rys. 2.5). Wszystkie detektory w matrycy sączytywane są praktycznie w jednym momencie czasu w ten sposób rejestruje się jednocześnie cały obraz.



Rys 2.5 Zasada rejestracji obrazu na matrycy detektorów

## 2.4 Radar

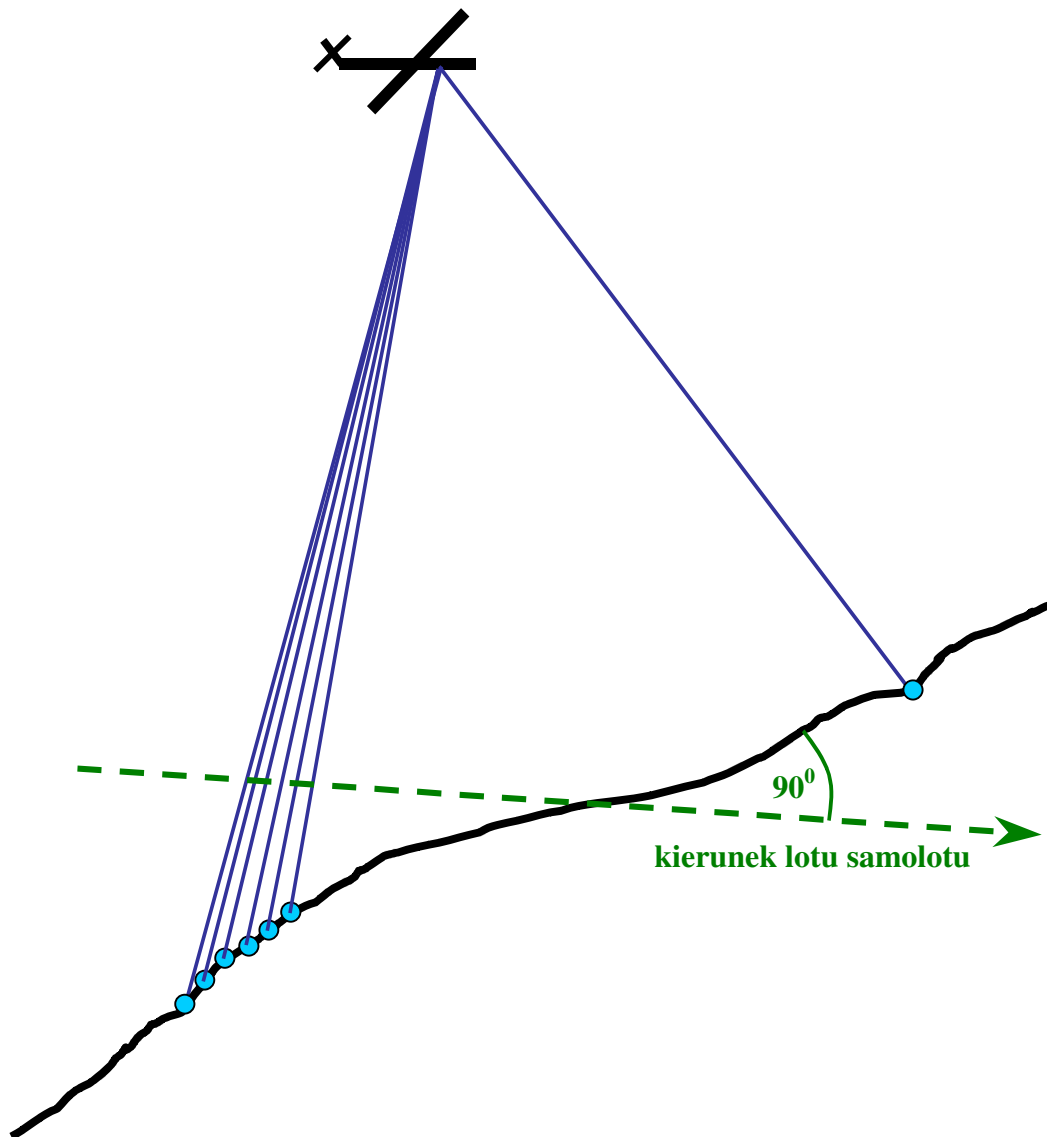
Opisane powyżej metody rejestracji obrazu są metodami pasywnymi. Emulsja światłoczuła filmu fotograficznego lub detektory rejestrują promieniowanie własne obiektów lub odbite promieniowanie słoneczne. Radar jest urządzeniem aktywnym, wysyła bowiem impulsy własnego promieniowania i rejestruje ich odbicia od obiektów. Powszechnie w teledetekcji stosowany jest radar boczego wybierania (SLAR) rejestrujący obraz terenu w pasie leżącym obok linii przelotu nośnika (samolot, satelita) radaru (rys 2.6). SLAR wykorzystuje promieniowanie mikrofalowe o długości fali od kilku do kilkudziesięciu cm.



Rys. 2.6 Zasada działania radaru bocznego wybierania (SLAR)

## 2.5 Skaner laserowy

Idea działania skanera laserowego jest podobna do działania radaru. Wykorzystywane w nim jest spójne promieniowanie laserowe z reguły z zakresu bliskiej podczerwieni. Skaner wysyła impulsy światła laserowego i mierzy czas potrzebny do powrotu odbitego promienia. Umożliwia to precyzyjny pomiar odległości od skanera do punktu odbicia. Pomiar odchylenia promienia od pionu oraz precyzyjne wyznaczenie położenia skanera w przestrzeni (GPS i INS – systemy do precyzyjnego pozycjonowania skanera) umożliwiają wyznaczenie współrzędnych punktu odbicia promienia z dokładnością od kilkunastu do kilkudziesięciu cm. Linia skanowania jest przeważnie prostopadła do kierunku lotu samolotu. Odległość od siebie kolejnych, mierzonych na tej linii punktów odbicia wynosi od 30 cm do kilku m.

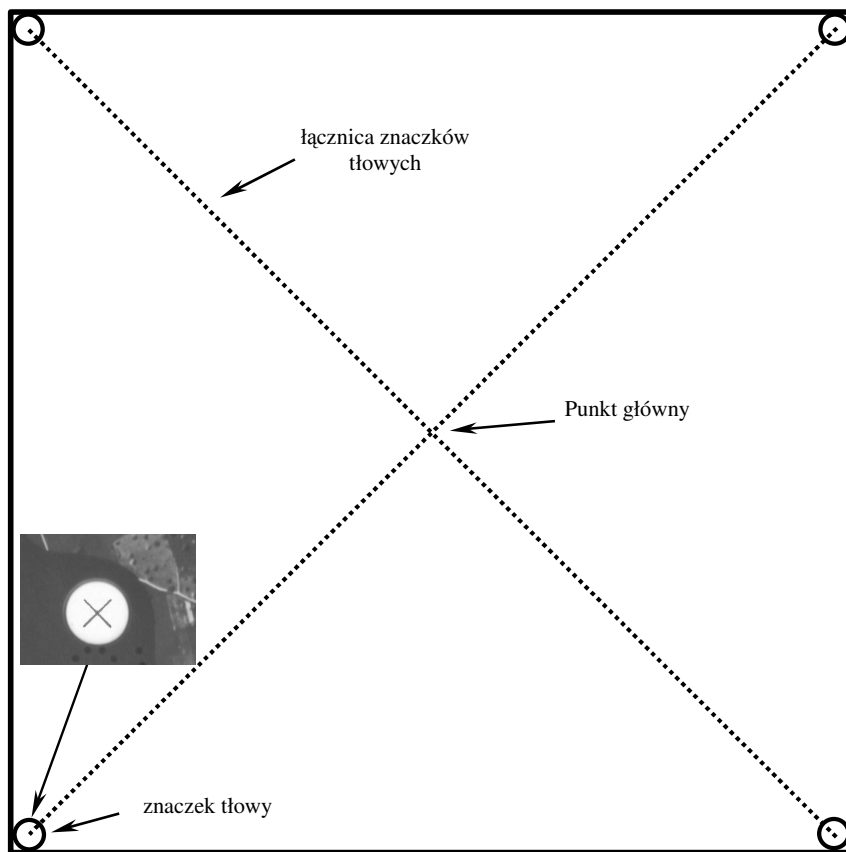


Rys 2.7 Lotniczy skaner laserowy (LIDAR)

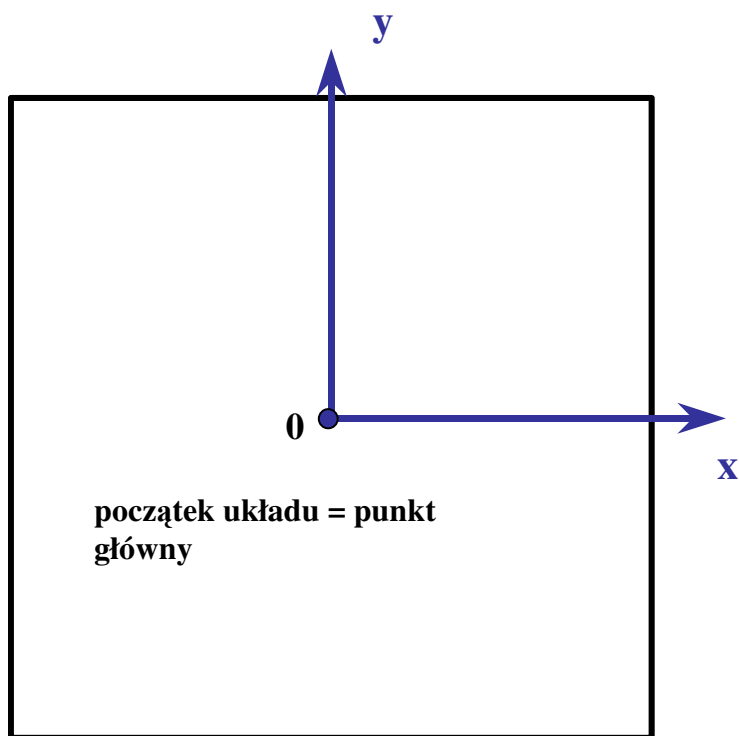
### 3. Matematyczny opis wybranych zagadnień fotogrametrycznych

#### 3.1 Zdjęcie fotogrametryczne - układ współrzędnych zdjęcia, elementy orientacji wewnętrznej zdjęcia

Punkt główny jest pojęciem matematycznym, fizycznie nie istnieje i nie odfotografowuje się na zdjęciu. Aby zaznaczyć jego położenie na zdjęciu instaluje się w kamerze znaczki tłowe. W kamerze lotniczej są minimum cztery znaczki tłowe w narożnikach, nieraz uzupełnia się je dodatkowymi czterema na środkach boków zdjęcia. Powinny one być tak zamontowane, aby ich łącznice przecinały się w punkcie głównym. Przeważnie jest to spełnione z dokładnością kilku mikrometrów. Dla dużej części pomiarów błąd ten można zaniedbać, ale dla precyzyjnych pomiarów jest to błąd istotny.



Rys. 3.1 Znaczkę tłowe na zdjęciu lotniczym



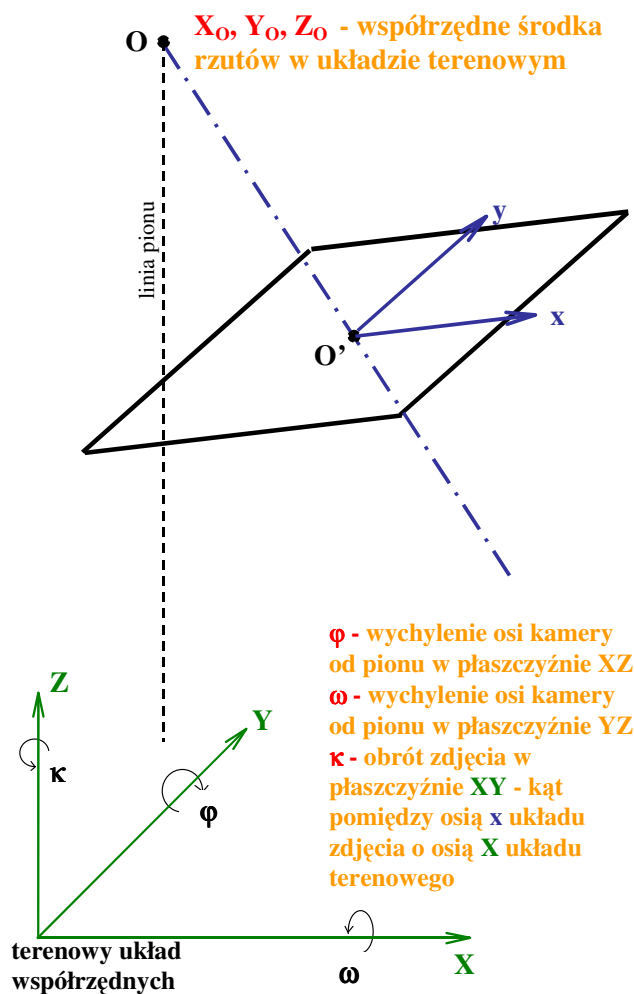
Rys. 3.2 Układ współrzędnych tłowych zdjęcia

Niektóre wzory stosowanych w fotogrametrii stają się prostsze, jeśli współrzędne punktu na

zdjęciu wyrazi się w układzie o początku na osi kamery. Dlatego zwykle stosuje się układ współrzędnych oznaczony na rysunku  $x,y$  (układ współrzędnych tłowych) o początku w punkcie głównym (punkt główny jest jednocześnie punktem przebicia zdjęcia przez oś kamery). Aby odtworzyć wiązkę promieni, które utworzyły obraz, należy z punktów obrazu poprowadzić proste przez środek rzutów. W związku z tym konieczna jest znajomość położenia środka rzutów względem zdjęcia. Położenie środka rzutów otrzymamy wyprowadzając z punktu głównego zdjęcia prostą prostopadłą i odmierając na niej stałą kamery  $c_k$ . Położenie punktu głównego oraz wielkość  $c_k$  nazywamy elementami orientacji wewnętrznej, gdyż umożliwiają odtworzenie kształtu wiązki promieni, czyli przebiegu promieni wewnątrz kamery. Elementy orientacji wewnętrznej kamery wyznacza się w procesie kalibracji kamery. W procesie kalibracji kamery wyznacza się również współrzędne znaczków tłowych w układzie tłowym ( $x, y$ ).

### 3.2 Elementy orientacji zewnętrznej zdjęcia lotniczego

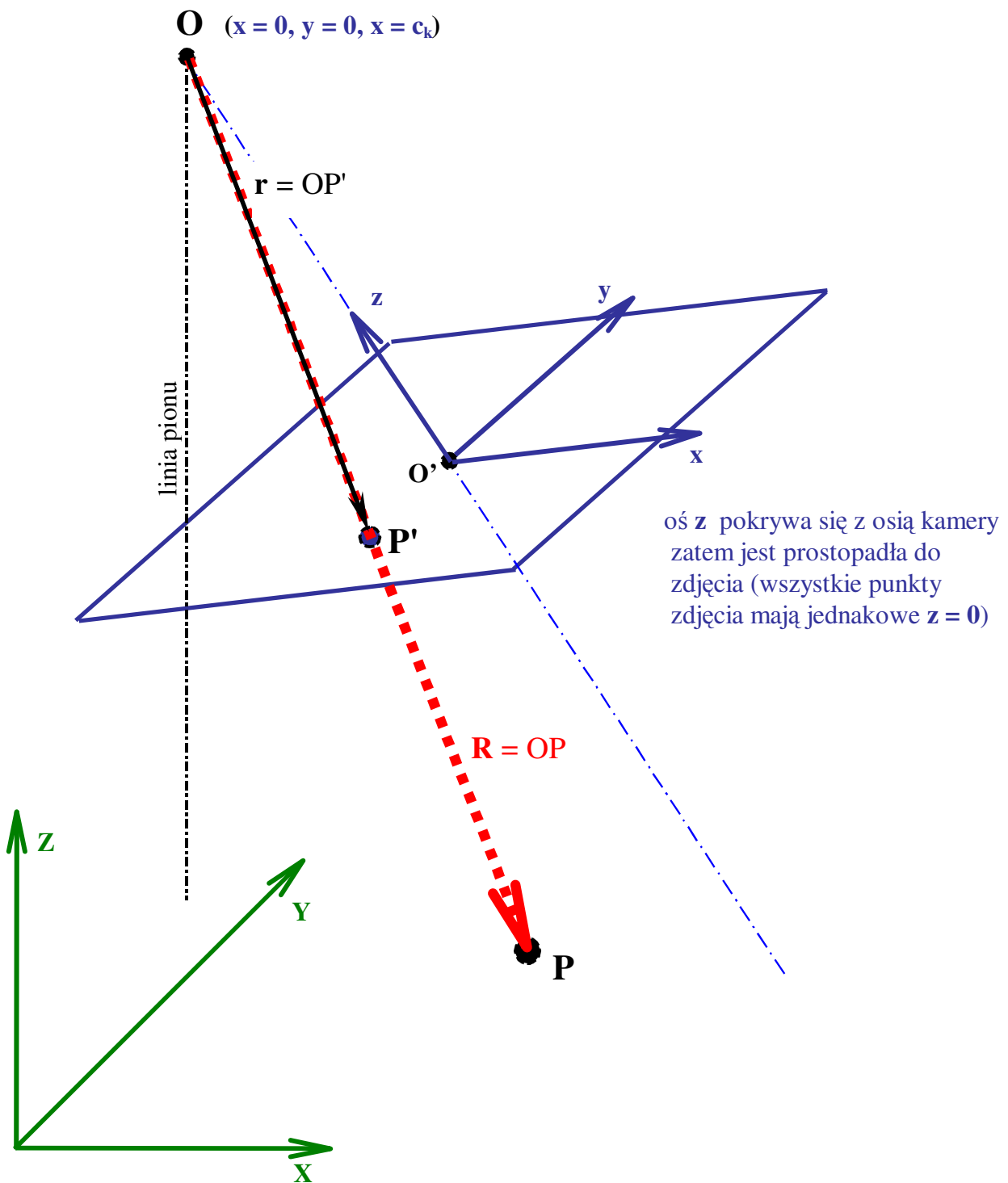
Elementy orientacji zewnętrznej zdjęcia umożliwiają umieszczenie wiązki promieni rzutujących zdjęcia (odtworzonej wcześniej z wykorzystaniem elementów orientacji wewnętrznej) w tym miejscu przestrzeni, w którym kamera znajdowała się i o takiej orientacji, jaką posiadała w momencie wykonania zdjęcia.



Rys. 3.2 Elementy orientacji zewnętrznej zdjęcia lotniczego

### 3.3 Równanie kolinearności





Rys. 3.3 Układy współrzędnych oraz wektory stosowane w równaniu kolinearności.

Wektor  $r$  ma współrzędne w układzie zdjęcia:

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} - \mathbf{0} \\ \mathbf{y} - \mathbf{0} \\ \mathbf{0} - \mathbf{c}_k \end{bmatrix} \quad \text{czyli} \quad \mathbf{r} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{y} \\ -\mathbf{c}_k \end{bmatrix}$$

Wektor  $\mathbf{R}$  ma zaś współrzędne w układzie terenowym:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{X} - \mathbf{X}_0 \\ \mathbf{Y} - \mathbf{Y}_0 \\ \mathbf{Z} - \mathbf{Z}_0 \end{bmatrix}$$

Wektory  $\mathbf{R}$  i  $\mathbf{r}$  są współliniowe, mają wspólny początek, a różnią się jedynie długością. Stosunek długości  $|\mathbf{R}| : |\mathbf{r}| = \lambda$

Układy współrzędnych: terenowy i zdjęcia różnią się orientacją w przestrzeni. Orientację zdjęcia w przestrzeni zdefiniowanej przez terenowy układ współrzędnych opisują katowe elementy orientacji (kąty  $\varphi$ ,  $\omega$ ,  $\kappa$ ). Te same kąty opisują orientację układu zdjęcia (bo jest on związany ze zdjęciem) w układzie terenowym. Tą orientację można opisać za pomocą macierzy  $\mathbf{A}$ :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & -\cos \varphi \sin \kappa & \sin \varphi \\ \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \varphi \\ \sin \omega \sin \kappa + \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix}$$

Warunek kolinearności wektorów  $\mathbf{R}$  i  $\mathbf{r}$  można zapisać:

$$\mathbf{R} = \lambda * \mathbf{A} * \mathbf{r} \quad (3.1)$$

Po podstawieniu współrzędnych wektorów i wartości macierzy zapisanych symbolicznie otrzymamy:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X} - \mathbf{X}_0 \\ \mathbf{Y} - \mathbf{Y}_0 \\ \mathbf{Z} - \mathbf{Z}_0 \end{bmatrix} = \lambda * \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{y} \\ -\mathbf{c}_k \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Wzór 2.3 możemy przekształcić:

$$\mathbf{r} = \frac{1}{\lambda} * \mathbf{A}^{-1} * \mathbf{R} \quad (3.3)$$

czyli:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{y} \\ -\mathbf{c}_k \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda} * \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \mathbf{X} - \mathbf{X}_0 \\ \mathbf{Y} - \mathbf{Y}_0 \\ \mathbf{Z} - \mathbf{Z}_0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

### 3.4 Wybrane zastosowania równania kolinearności.

### 3.4.1 Obliczenie terenowych współrzędnych pomierzonych na zdjęciach punktów

Aby wyznaczyć położenie w terenie pomierzonego na zdjęciach punktu musimy znać orientację tych zdjęć w przestrzeni. Jak pamiętamy opisana ona jest przez elementy orientacji zewnętrznej czyli trzy współrzędne terenowe środka rzutów i trzy kąty opisujące odchylenie osi kamery i skrócenie zdjęcia względem tego układu terenowego. Musimy także znać elementy orientacji wewnętrznej zdjęcia, aby odtworzyć kształt wiązki promieni rzutujących.

Z równania 3.1 wynika iż wyznaczenie położenia punktu na podstawie jednego zdjęcia jest niemożliwe. Po wymnożeniu odpowiednio macierzy i wektorów otrzymamy **trzy** równania

$$\begin{aligned} X &= \lambda * (a_{11} * x + a_{12} * y - a_{13} * c_k) + X_0 \\ Y &= \lambda * (a_{21} * x + a_{22} * y - a_{23} * c_k) + Y_0 \\ Z &= \lambda * (a_{31} * x + a_{32} * y - a_{33} * c_k) + Z_0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

W równaniach tych znana jest wartość elementów orientacji wewnętrznej ( $c_k$ ) i zewnętrznej ( $X_0, Y_0, Z_0$ , macierz  $A$  czyli kąty  $\varphi, \omega, \kappa$ ) zdjęcia oraz współrzędne  $x, y$  obrazu punktu na zdjęciu, natomiast nieznanne są aż **cztery** wielkości ( $X, Y, Z, \lambda$ ). Rozwiązanie trzech równań z czterema niewiadomymi jest niemożliwe czyli na podstawie jednego zdjęcia nie można wyznaczyć położenia odfotografowanego na nim punktu terenowego.

Aby wyznaczyć położenie wybranego punktu w terenie potrzebujemy dwóch zdjęć na których odfotografowany jest ten punkt. Otrzymamy wówczas sześć równań 3.5 (po trzy dla każdego zdjęcia), a w nich jedynie pięć niewiadomych ( $X, Y, Z, \lambda_{\text{lewego zdjęcia}}, \lambda_{\text{prawego zdjęcia}}$ ). Rozwiązując układ sześciu równań z pięcioma niewiadomymi wyznaczamy poszukiwane wartości  $X, Y, Z$  z wyrównaniem. Ta procedura wyznaczenia współrzędnych nosi nazwę fotogrametrycznego wcięcia wprzód.

### 3.4.2 Wyznaczenie współrzędnych punktu w układzie zdjęcia na podstawie współrzędnych terenowych

Rozpisujemy równanie 3.3:

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{\lambda} * \{a_{11} * (X - X_0) + a_{21} * (Y - Y_0) + a_{31} * (Z - Z_0)\} \\ y &= \frac{1}{\lambda} * \{a_{12} * (X - X_0) + a_{22} * (Y - Y_0) + a_{32} * (Z - Z_0)\} \\ -c_k &= \frac{1}{\lambda} * \{a_{13} * (X - X_0) + a_{23} * (Y - Y_0) + a_{33} * (Z - Z_0)\} \end{aligned} \quad (3.6)$$

W tym przypadku znamy elementy orientacji wewnętrznej ( $c_k$ ), elementy orientacji zewnętrznej ( $X_0, Y_0, Z_0$ , macierz  $A$ ), oraz współrzędne terenowe punktu ( $X, Y, Z$ ). Nieznane są współrzędne punktu w układzie zdjęcia ( $x, y$ ) oraz współczynnik  $\lambda$ . W związku z tym w trzech równaniach 3.6 mamy trzy niewiadome, czyli rozwiązanie jest jednoznaczne.

Z trzeciego równania wyznaczymy współczynnik  $\lambda$ :

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{-c_k}{a_{13} * (X - X_0) + a_{23} * (Y - Y_0) + a_{33} * (Z - Z_0)}$$

po podstawieniu do dwóch pierwszych równań otrzymamy dwa równania z dwoma

szukanymi niewiadomymi:

$$\begin{aligned}x &= -c_k \frac{a_{11}*(X - X_0) + a_{21}*(Y - Y_0) + a_{31}*(Z - Z_0)}{a_{13}*(X - X_0) + a_{23}*(Y - Y_0) + a_{33}*(Z - Z_0)} \\y &= -c_k \frac{a_{12}*(X - X_0) + a_{22}*(Y - Y_0) + a_{32}*(Z - Z_0)}{a_{13}*(X - X_0) + a_{23}*(Y - Y_0) + a_{33}*(Z - Z_0)}\end{aligned}\tag{3.7}$$

### 3.4.3 Wyznaczenie elementów orientacji zewnętrznej

W fotogrametrii lotniczej do niedawna nie było możliwe dokładne wyznaczenie elementów orientacji zewnętrznej kamery bezpośrednio w czasie wykonywania zdjęć. Ostatnio dzięki zastosowaniu GPS możliwe jest dość dokładne wyznaczanie współrzędnych środków rzutów.. Wykorzystuje się również przyrządy żyroskopowe (systemy INS) do wyznaczania wartości kątowych elementów orientacji zewnętrznej.

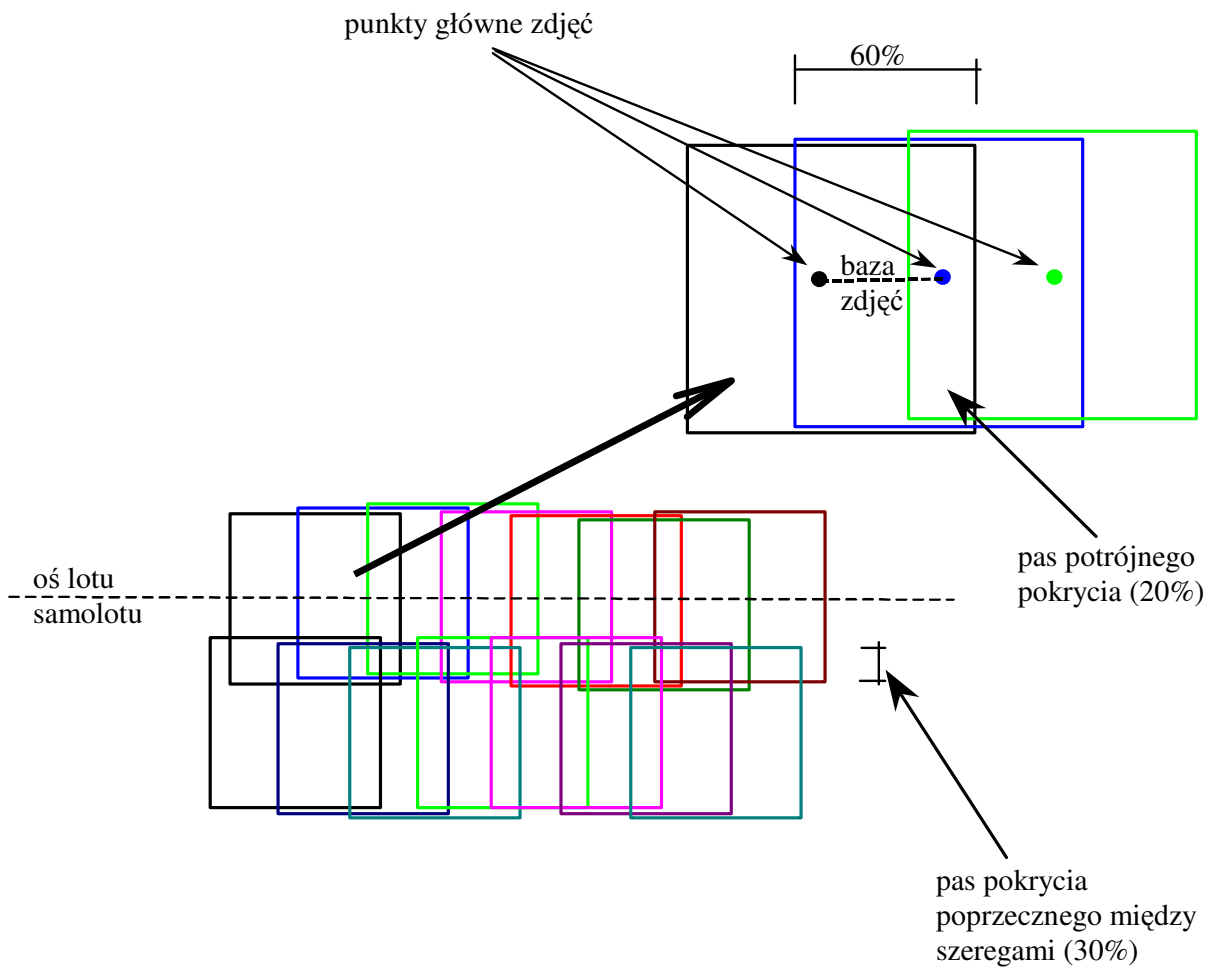
Dla zdjęć lotniczych elementy orientacji zewnętrznej najczęściej wylicza się w procesie kameralnego opracowania zdjęć. Stosowanych jest kilka metod. Jedną z nich jest fotogrametryczne wcięcie wstecz.

#### Fotogrametryczne wcięcie wstecz

Na zdjęciu wykonuje się pomiar współrzędnych tłowych odfotografowanych punktów o znanych współrzędnych terenowych. W równaniu 3.7 znane są wówczas współrzędne tłowe ( $x$ ,  $y$ ) i współrzędne terenowe ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) pomierzonych punktów oraz elementy orientacji wewnętrznej ( $c_k$ ). Nieznane są współrzędne środka rzutów ( $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ ), macierz  $\mathbf{A}$  - której elementy składają się funkcji trygonometrycznych (czyli w postaci uwikłanej) kątów  $\varphi$ ,  $\omega$ ,  $\kappa$  oraz współczynniki  $\lambda$ . Ilość niewiadomych wynosi więc  $6+i$  gdzie  $i$  - ilość punktów. Dla trzech punktów otrzymamy dziewięć równań z dziewięcioma niewiadomymi. Większa ilość punktów umożliwia wyznaczenie niewiadomych z wyrównaniem.

## 4. Wykonanie zdjęć lotniczych

Kamera do wykonywania zdjęć lotniczych zawieszona jest we wnętrzu samolotu i fotografuje przez luk w podłodze. Z reguły wykonuje się zdjęcia szeregowo tzn. samolot leci po linii prostej i kamera co pewien czas wykonuje zdjęcie. Po wykonaniu zdjęć w jednym szeregu samolot leci wzdłuż linii równoległej do poprzedniej itd. Powstaje w ten sposób tzw. blok zdjęć. Z rozważań w rozdz. 3.3.1.a wynika, że dla określenia położenia punktu w terenie musi on być odfotografowany na co najmniej dwóch kolejnych zdjęciach. Dlatego zdjęcia wykonuje się w ten sposób, że kolejne zachodzą na siebie co najmniej 50% aby każdy fragment terenu został odfotografowany na co najmniej dwóch. Ponieważ samolot zawsze leci mniej lub więcej niestabilnie, aby uniknąć ewentualnych braków, pokrycie zdjęć w szeregu (pokrycie podłużne) wynosi zazwyczaj średnio 60%. Również sąsiednie szeregi zachodzą na siebie tworząc tzw. pokrycie poprzeczne (przeważnie 30%).



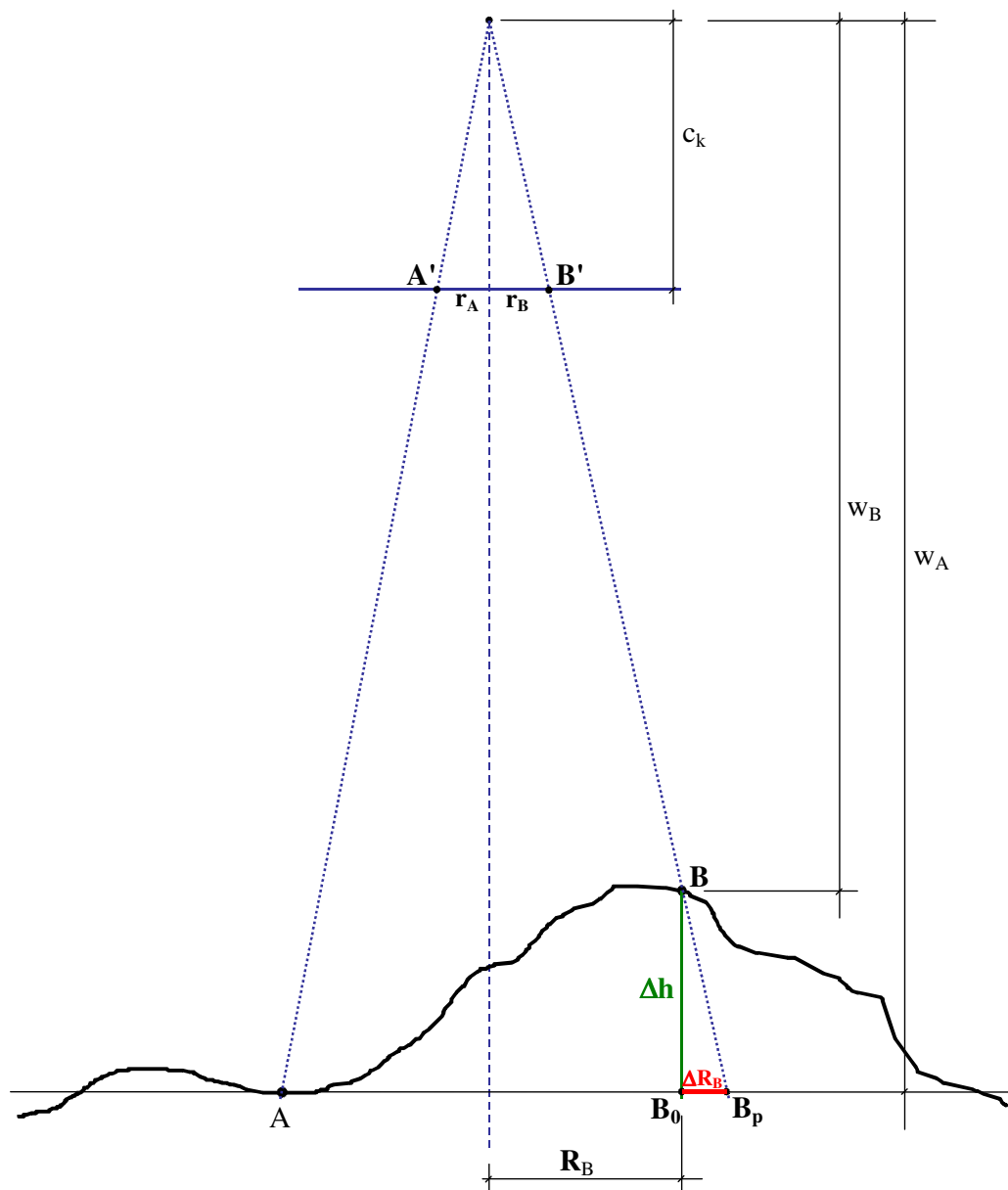
Rys. 4.1 Sposób wykonania szeregowych zdjęć lotniczych

## 5. Skala i zniekształcenia zdjęcia lotniczego

Skala obrazu na zdjęciu fotograficznym opisana jest wzorem:

$$1 : m_z = c_k : w \quad (5.1)$$

gdzie  $w$  – wysokość lotu ponad terenem



Rys. 5.1 Skala i zniekształcenia obrazu zdjęcia lotniczego.

Skala zdjęcia lotniczego jest nierównomierna. Otoczenie punktu  $A$  (rys. 5.1) odfotografowane jest w skali mniejszej niż otoczenie punktu  $B$  ( $w_A > w_B$ ).

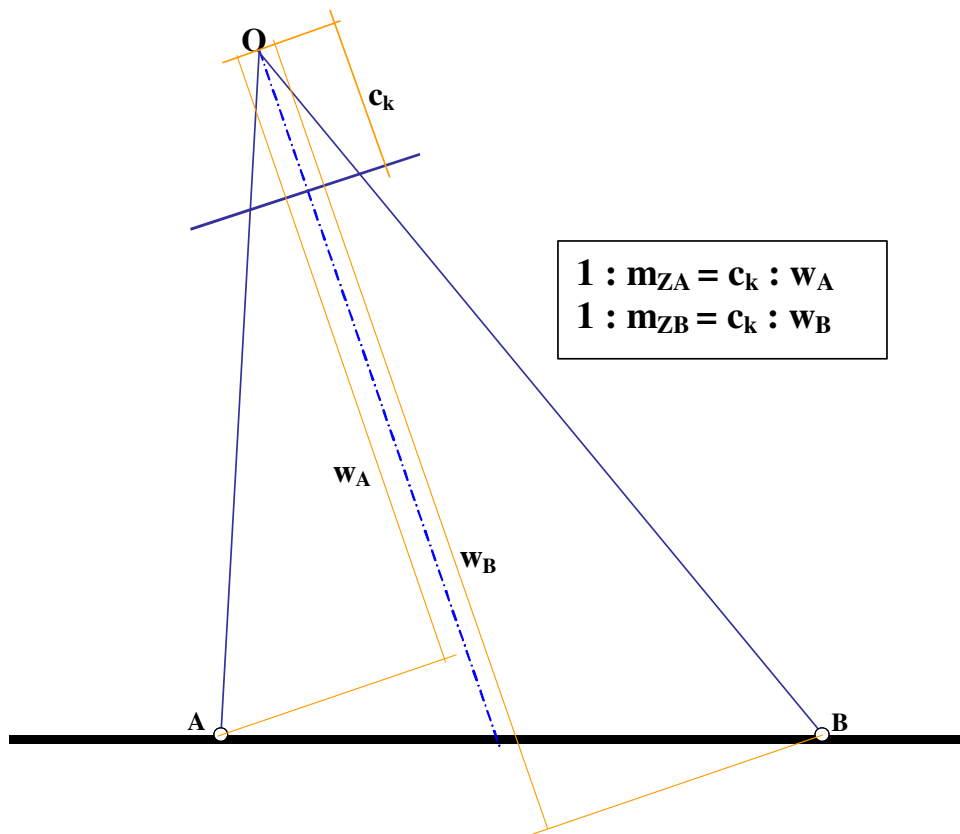
Nie jest zatem możliwe wykorzystanie zdjęcia terenu pofalowanego jako mapy. Powstaną, bowiem wówczas błędy położenia jednego punktu (np. A) względem drugiego (np. B) opisane wzorem:

$$\frac{\Delta R}{\Delta h} = \frac{r}{c_k} \quad (5.2)$$

$$\Delta R = \frac{\Delta h * r}{c_k} \quad (5.3)$$

Jak widać wielkość błędu zależy od różnicy wysokości pomiędzy punktami (im większa tym większy błąd) odległości punktu od „środkła zdjęcia” (im dalej tym błąd większy), a także od stałej kamery (zdjęcia z kamer krótkoogniskowych czyli szerokokątnych mają większe błędy).

Podobne zniekształcenia powoduje również wychylenie osi kamery od pionu. Ponieważ praktycznie każde zdjęcie jest w jakimś stopniu wychylone, nie można zdjęcia wykorzystywać jako mapy nie tylko dla terenów pofalowanych, ale również dla terenów płaskich.



Rys 5.2 Nierównomierność skali na zdjęciu nachylonym

## 6. Opracowanie map fotograficznych

### 6.1 Wstęp

Fotomapa jest to mapa w postaci fotograficznej (wg niektórych źródeł opracowana przez przetwarzanie rzutowe). Niestety nie da się wykonać fotomapy przez powiększenie zdjęcia do żądanej skali, gdyż zdjęcie lotnicze ma niejednakową skalę. Spowodowane to jest deniwelacjami terenu oraz nachyleniem zdjęcia (rozdz. 5). Wpływ nachylenia zdjęcia da się łatwo usunąć przez przetworzenie zdjęcia metodą przekształcenia rzutowego, natomiast wpływ deniwelacji terenu usuwa się znacznie trudniej wykorzystując technikę przetwarzania różniczkowego czyli ortofotografii.

W chwili obecnej przetwarzanie zdjęć wykonuje się praktycznie wyłącznie z wykorzystaniem obrazów cyfrowych.

### 6.2 Przetworzenie obrazu cyfrowego

Elementarnym elementem obrazu cyfrowego podlegającym przetworzeniu jest piksel.

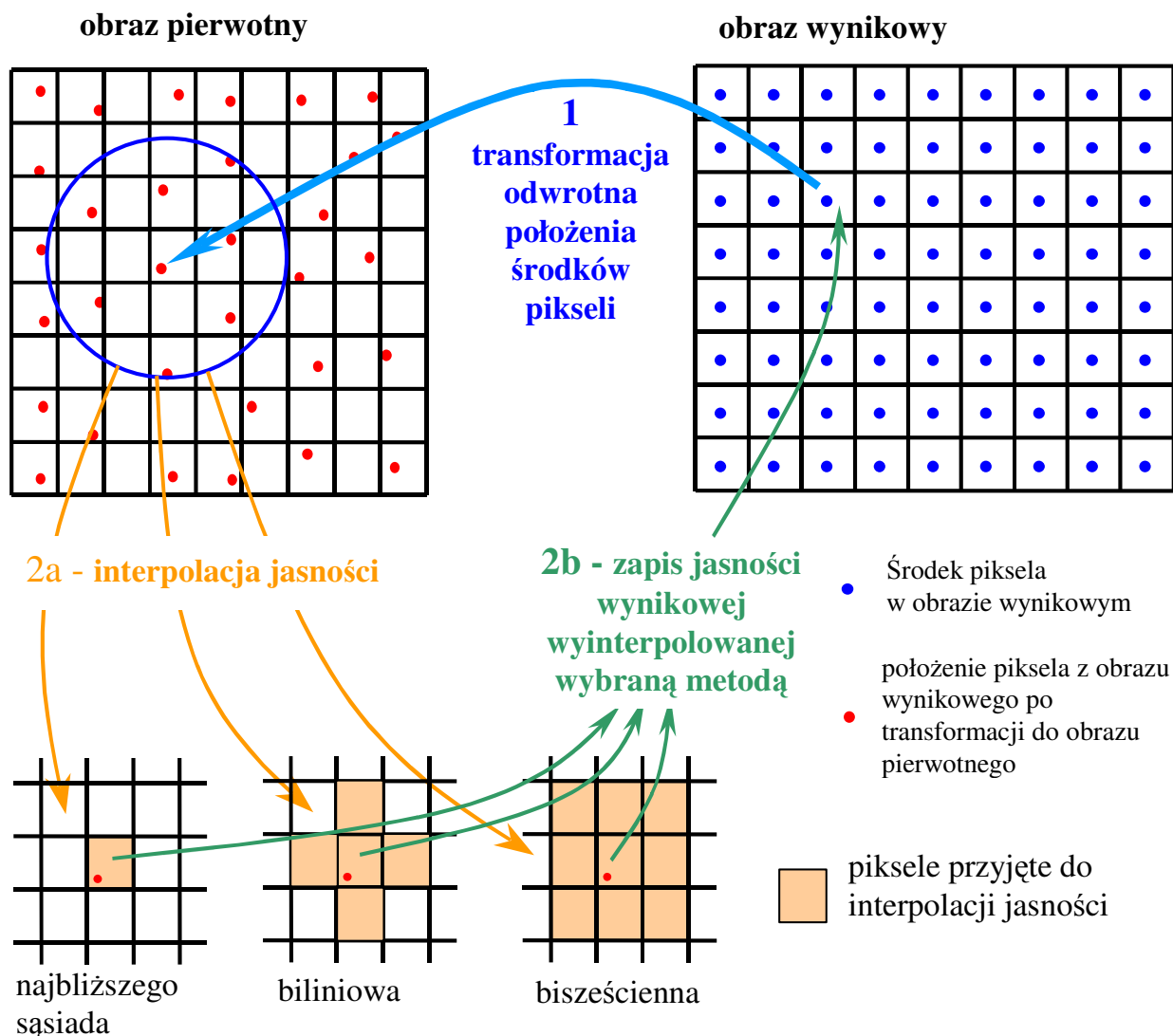
Pierwszym etapem przekształcenia jest transformacja współrzędnych środków poszczególnych pikseli do położenia na obrazie wynikowym. W wyniku otrzymamy nieregularną siatkę „nowych pikseli” (rys. 6.1). Obraz cyfrowy musi być podzielony na regularną siatkę pikseli. Związku z tym drugim etapem jest tzw. „resampling” tzn. interpolacja jasności regularnej siatki pikseli na podstawie nieregularnie rozłożonych „nowych pikseli”.

Metoda odwrotna polega na tym, że transformacja położenia środków pikseli dokonywana jest w kierunku odwrotnym niż poprzednio. Środki pikseli obrazu wynikowego transformowane są na obraz pierwotny. Następnie jasność przetransformowanego środka pikseli jest interpolowana na podstawie otaczających go pikseli obrazu pierwotnego. Wynierpolowana jasność przypisywana jest przetwarzanemu pikselowi obrazu wtórnego

Stosuje się różne metody interpolacji:

- najbliższego sąsiada (jasność pikseli obrazu wynikowego równa jest jasności najbliższego z przetransformowanych środków obrazu pierwotnego)
- interpolacja ze zbioru kilku otaczających przetransformowanych środków obrazu pierwotnego z wykorzystaniem jakiejś funkcji (np. biliniowa, bisześcienna).





Rys. 6.1 Zasada przetworzenia obrazu metodą transformacji odwrotnej:  
 etap 1 – transformacja środków pikseli z obrazu wynikowego na pierwotny  
 etap 2 – interpolacja jasności piksela obrazu wynikowego na podstawie jasności odpowiadających pikseli obrazu pierwotnego

### 6.3 Przekształcenie rzutowe

Pojęcie płaszczyzny punktów: jest to płaszczyzna jako zbiór punktów w określony sposób uporządkowany (np. płaszczyzna zdjęcia, rysunku itp.). Transformacja płaszczyzny punktów musi oprócz opisu zmiany położenia płaszczyzny zawierać także informację o zmianie uporządkowania jej punktów. Jedną z takich transformacji jest przekształcenie rzutowe. Dwie płaszczyzny punktów zależne od siebie rzutowo można opisać, że są to dwie płaszczyzny przecinające tę samą wiązkę prostych (rys. 6.2).

Zależność rzutową płaszczyzny punktów  $\alpha$  i płaszczyzny  $\alpha'$  można zapisać wzorem:

$$\begin{aligned}
 x' &= \frac{Ax + By + C}{Dx + Ey + 1} \\
 y' &= \frac{Fx + Gy + H}{Dx + Ey + 1}
 \end{aligned}
 \tag{6.1}$$

Jak widać równanie to zawiera osiem współczynników. Ponieważ jedna para punktów jednoimiennych (odpowiadających sobie na dwóch obrazach) dostarcza dwa równania to do wyznaczenia współczynników potrzeba cztery pary punktów odpowiadających sobie (żadne trzy z nich nie mogą leżeć na jednej prostej). Najkorzystniej, jeśli punkty te ograniczają obszar przetwarzania i kształt tworzonej przez nich figury jest zbliżony do kwadratu (punkty A, B, C, D - rys. 6.2).

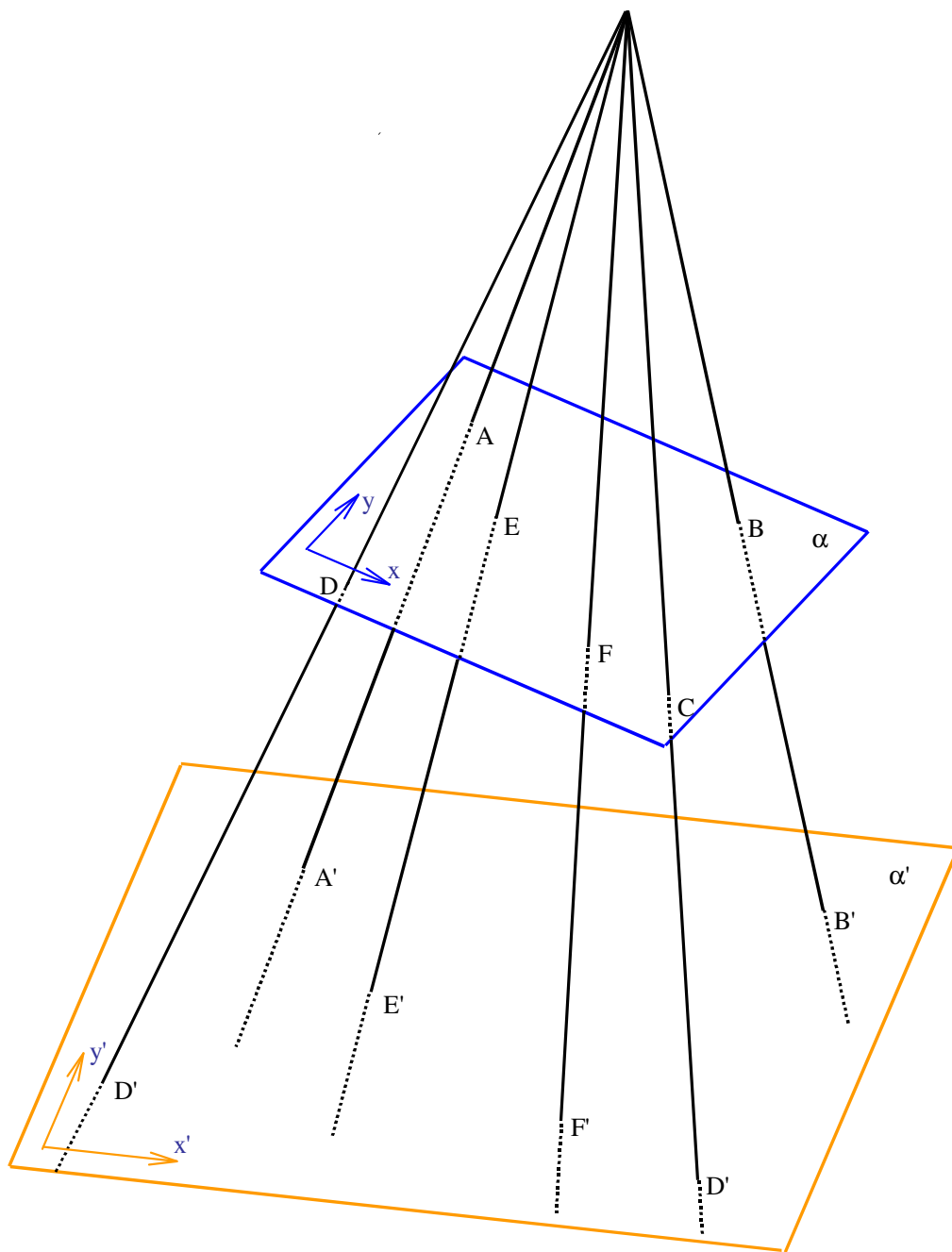
Fotomapa jest płaszczyzną punktów. Zdjęcie można przetworzyć rzutowo w mapę, jeśli da się przeprowadzić następujący ciąg przetworzeń rzutowych: zdjęcie - teren – fotomapa (w przekształceniu rzutowym wszystkie utwory muszą być tego samego wymiaru). Zdjęcie lotnicze jest płaszczyzną punktów. Taki ciąg przetworzeń możliwy jest zatem tylko wtedy, jeśli teren jest również płaszczyzną punktów. Tak więc fotomapa (jako płaszczyzna punktów) może być wykonana przez przetworzenie rzutowe zdjęcia wtedy, gdy sfotografowany teren można uznać za płaszczyznę.

Kryteria tego uznania wynikają z wzoru 5.2. Wzór ten można przekształcić:

$$\Delta h = \frac{\Delta R * c_k}{r}
 \tag{6.2}$$

Jeżeli podstawimy wartości maksymalne promienia radialnego  $r = r_{\max}$  i dozwolonej odchyłki w terenie  $\Delta R_{\max} = \pm 0.3 \text{ mm} * m_{\text{fotomapy}}$  otrzymamy maksymalną różnicę wysokości terenu przekroczenie której oznacza, że teren odfotografowany na zdjęciu nie może być potraktowany jako płaski, czyli, że nie można przetworzyć tego zdjęcia na fotomapę za pomocą przekształcenia rzutowego.

$$\Delta h_{\max} = \frac{\Delta R_{\max} * c_k}{r_{\max}}
 \tag{6.3}$$



Rys. 6.2 Zasada przekształcenia rzutowego płaszczyzny na płaszczyznę

## 6.4 Ortofotografia

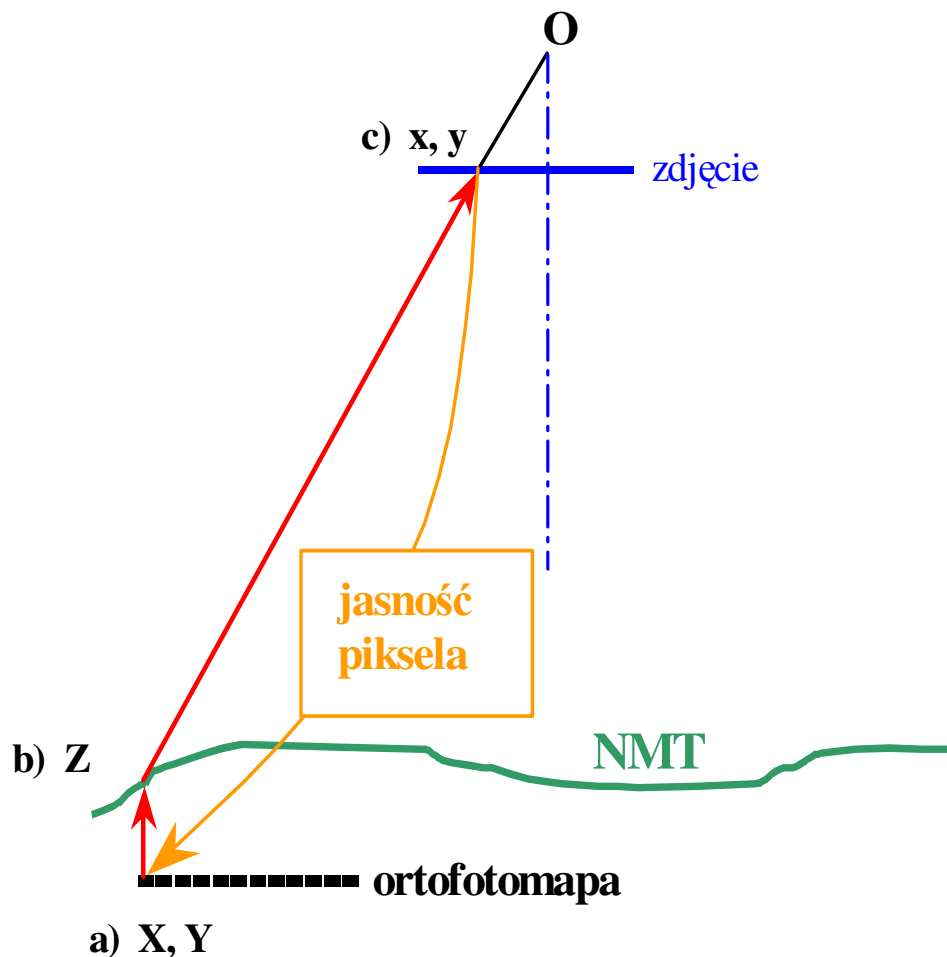
Ortofotografia, czyli przetwarzanie różniczkowe zdjęcia, polega na przetworzeniu zdjęcia z rzutu środkowego na rzut ortogonalny w stosunku do płaszczyzny odniesienia. Niestety nie da się tego opisać jakimś jednym równaniem. Przetworzenie to polegać musi na podzieleniu obrazu na elementarne fragmenty i przetwarzaniu tych fragmentów każdego z osobna, a następnie połączeniu ich w całość. Przy przetwarzaniu obrazów cyfrowych elementarnym fragmentem

obrazu jest piksel. Danymi do takiego przetwarzania są: zdjęcie lotnicze o znanych elementach orientacji wewnętrznej i zewnętrznej oraz numeryczny model terenu opisujący kształt powierzchni terenu. Znajomość kształtu terenu umożliwia wprowadzenie korekcji przekształcającej obraz z rzutu środkowego na ortogonalny.

Stosowane są dwie metody przetwarzania: metoda wprost i metoda odwrotna. Poniżej zostanie opisana metoda odwrotna (rys. 6.3).

Tworzymy najpierw „pustą” ortofotomapę czyli obraz podzielony na piksele, ale bez znajomości jasności tych pikseli. Ponieważ jest to mapa to ma określone współrzędne (w układzie terenowym) narożników obrazu. Po podzieleniu na piksele znamy więc współrzędne (X, Y) środków poszczególnych pikseli.

Kolejno przetwarzany jest każdy piksel ortofotomapy. Znanie są współrzędne X, Y jego środka natomiast nieznana jest współrzędna Z. Współrzędna ta wyznaczana jest przez interpolację z numerycznego modelu terenu. Po tej interpolacji znamy już X, Y, Z środka piksela. Następnie wyliczane jest położenie na zdjęciu (w układzie zdjęcia) punktu odpowiadającego środkowi piksela ortofotomapy.



Rys 6.3 Opracowanie ortofotomapy metodą „odwrotną”

Można do tych wyliczeń wykorzystać równanie kolinearności 3.7 (zdjęcie ma znane elementy orientacji wewnętrznej i zewnętrznej).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -c_k \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda} * \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}$$

Ponieważ te wyliczone punkty przeważnie nie są środkami pikseli zdjęcia musi być interpolowana ich jasność na podstawie jasności otaczających je pikseli zdjęcia (rozdz. 6.2). Wyznaczona w ten sposób jasność przypisywana jest pikselowi ortofotomapy. Po wyznaczeniu w ten sposób jasności wszystkich pikseli ortofotomapy mamy wykonane przetworzenie.

## 7. Autografy

Autograf jest urządzeniem umożliwiającym rysowanie mapy oraz wyznaczanie współrzędnych terenowych punktów na podstawie stereogramu zdjęć lotniczych na bieżąco w czasie pomiaru czyli w tzw. czasie rzeczywistym. Stereogram zdjęć są to dwa zdjęcia tak wykonane, że można je obserwować stereoskopowo.

### 7.1 Stereoskopowa obserwacja zdjęć

Człowiek obserwuje przestrzeń jednocześnie przez dwoje oczu. Jego mózg kojarzy te dwa obrazy i tworzy z nich przestrzenny model. Jeśli odpowiednio wykonamy dwa zdjęcia i będziemy je obserwować - lewe zdjęcie lewym okiem, a prawe prawym wówczas nasz mózg również utworzy z nich przestrzenny model.

Aby zdjęcia można było obserwować stereoskopowo muszą to być zdjęcia tego samego obiektu, wykonane z dwóch różnych punktów tak, aby osie kamer były w przybliżeniu do siebie równoległe i aby skala zdjęć nie różniła się między sobą więcej niż 15%.

Zdjęcia do obserwacji stereoskopowej muszą być tak ułożone, aby odtworzyć płaszczyznę rdzenne (środki rzutów i punkt obserwowany tworzą płaszczyznę rdzenną), co praktycznie dla zdjęć o równoległych osiach kamer oznacza, że baza zdjęć powinna być równoległa do bazy obserwacji. Dla ułatwienia obserwacji stereoskopowej wykorzystuje się przyrządy zwane stereoskopami.

Jeżeli na tle obu zdjęć umieścimy w płaszczyźnie rdzennej jakiś symbol (znaczek) to będzie on również widziany stereoskopowo. Uzyskamy w ten sposób przestrzenny znaczek pomiarowy. Przestrzenna obserwacja tego znaczka umożliwi nam osadzenie go na dowolnym fragmencie obserwowanego modelu, niekoniecznie o bardzo wyraźnych szczegółach. Mierząc położenie tego znaczka określamy równocześnie położenie punktu na którym został on osadzony. Obserwacja stereoskopowa zdjęć wykorzystywana jest więc w fotogrametrii do identyfikacji mierzonych na zdjęciach punktów, szczególnie tam gdzie nie ma wyraźnych szczegółów.

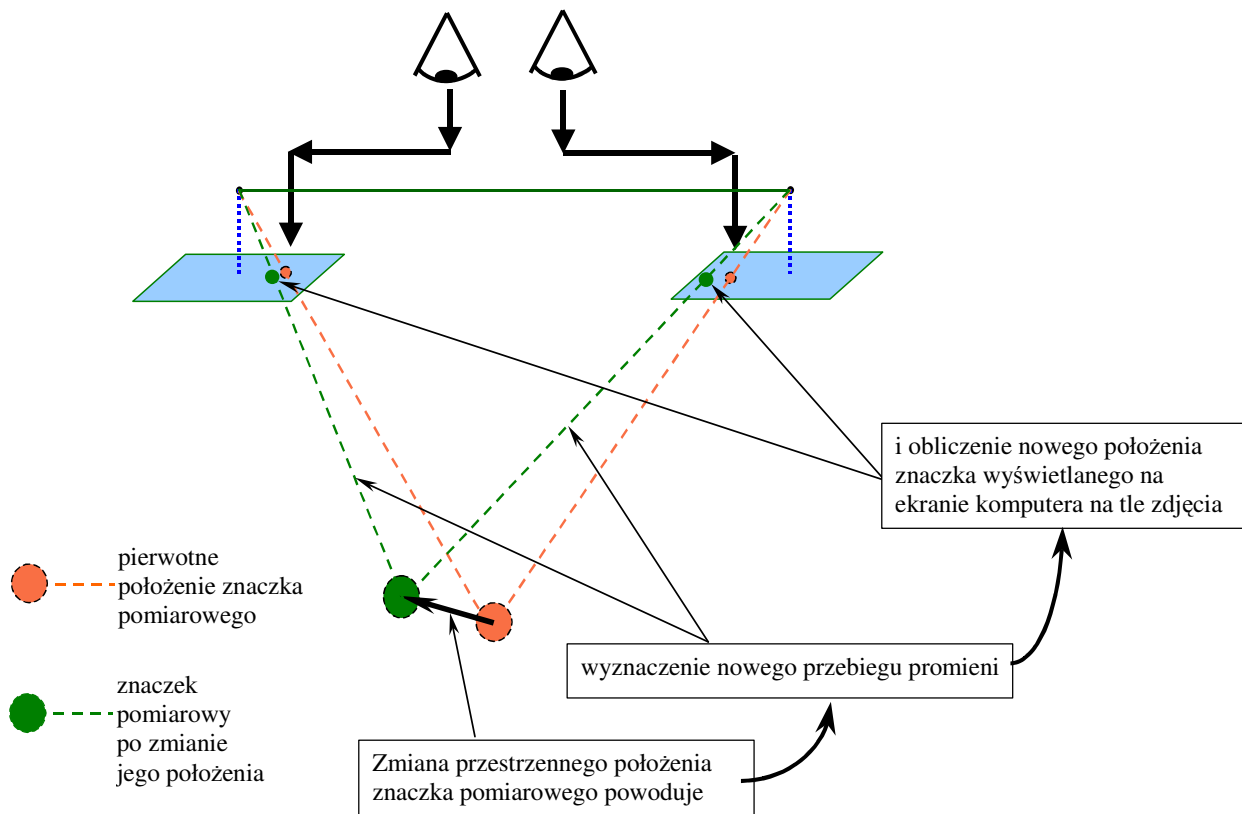
### 7.2 Zasada działania autografu

Działanie autografu polega na odtworzeniu wiązek promieni rzutujących z dwu zdjęć i ustawieniu tych wiązek tak, jak były zorientowane w czasie ich wykonywania.

Dawniej w autografach analogowych optyczno-mechanicznej lub znajdowały się odpowiednie kamery (zwane koszami) w których umieszczano zdjęcia fotogrametryczne. Zdjęcia te ustawiano odpowiednio, aby zajmowały takie położenie jakie posiadały w momencie ich wykonywania. Za pomocą promieni świetlnych (autografy o konstrukcji optycznej), wodzideł metalowych (konstrukcja mechaniczna) lub metodą mieszaną (autografy optyczno-mechaniczne) odtwarzano przebieg promieni rzutujących i w ten sposób uzyskiwano model powierzchni terenu.

Obecnie wykorzystuje się przede wszystkim autografy cyfrowe.

W autografie cyfrowym wykorzystuje się zdjęcia w postaci cyfrowej. Zdjęcia oryginalne skanuje się na specjalnych bardzo dokładnych skanerach. Obserwuje się je na ekranie monitora komputerowego. Na ekranie jest również wyświetlany znaczek pomiarowy, którego położenie sterowane jest przez komputer. Obserwator steruje ruchem znaczka pomiarowego generując zmiany jego współrzędnych przestrzennych (terenowych) X, Y, Z za pomocą odpowiednich urządzeń (korby, specjalne uchwyty, joysticki, myszy). Komputer w czasie rzeczywistym oblicza odpowiadające tym współrzędnym współrzędne tłowe na obu zdjęciach (np. wykorzystując równanie kolinearności (3.7)) i tam osadza obraz znaczka pomiarowego. Obserwator kontroluje czy doprowadził znaczek pomiarowy w to miejsce gdzie miał zamiar go osadzić, wprowadza ewentualne poprawki, a gdy osadzi znaczek może zarejestrować współrzędne terenowe tego punktu w pamięci komputera lub zaznaczyć ten punkt na rysunku pokazywanym na ekranie.



Rys 7.1 Zasada działania autografu

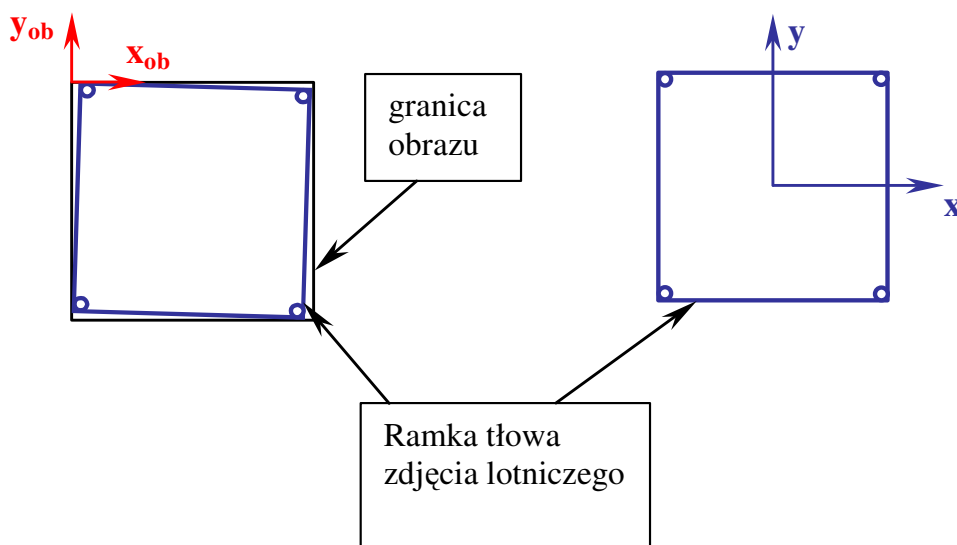
Dla uzyskania modelu stereoskopowego wykorzystuje się kilka różnych technik. Jedną z nich polega na wyświetlaniu lewego zdjęcia na lewej połowie ekranu, a prawego na prawej. Ekran obserwuje się wówczas za pomocą stereoskopu. Inna polega na wyświetlaniu na całym ekranie monitora naprzemiennie lewego lub prawego zdjęcia. Ekran ten obserwuje się za pomocą specjalnych okularów, które na sygnał z komputera (podłączenie kablem lub sygnał w podczerwieni) przepuszczają obraz do lewego oka, gdy wyświetlane jest lewe zdjęcie lub do

prawego, gdy wyświetlane jest prawe. Jeszcze inne rozwiązanie polega również na naprzemiennym wyświetlaniu na ekranie obrazu lewego i prawego zdjęcia, lecz do obserwacji ekranu używa się okularów, w których lewe „szkło” spolaryzowane jest inaczej niż prawe. Przed ekranem znajduje się specjalny filtr, który zmienia odpowiednio polaryzację obrazu w zależności od tego czy jest wyświetlane lewe czy prawe zdjęcie. Złożenie polaryzacji filtru i okularów umożliwia obserwację lewego zdjęcia lewym okiem, a prawego prawym.

Zasada działania autografu analitycznego jest identyczna jak cyfrowego. Różnica polega jedynie na tym, że stosuje się w nim oryginalne zdjęcia lotnicze umieszczone na szklanych nośnikach i obserwowane stereoskopowo przez specjalny układ optyczny. W pole widzenia tego układu wprowadzono znaczek pomiarowy, którego ruch sterowany jest przez obserwatora tak jak w autografie cyfrowym

### 7.3 Odtworzenie orientacji zdjęć w autografach

Aby na podstawie zdjęć w autografie można było wykonywać pomiary lub rysować mapę należy przeprowadzić procedurę orientacji modelu. Jej celem jest doprowadzenie do prawidłowej orientacji w przestrzeni wiązek promieni odtwarzanych ze zdjęć.



$x_{ob}, y_{ob}$  – układ obrazu (pikselowy)

$x, y$  - układ tłowy

Rys. 7.2 orientacja wewnętrzna zdjęć w autografie

Pierwszym etapem jest **orientacja wewnętrzna** zdjęć w autografie. Proces ten ma na celu przyporządkowanie układowi obrazowemu zdjęcia (jednostką jest w nim piksel) - układu współrzędnych tłowych. Położenie pikseli na obrazie cyfrowym (w tym wypadku zdjęcia lotniczego) jest określone w układzie obrazu ( $x_{ob}, y_{ob}$ , - rys. 7.2) natomiast we wzorach posługujemy się układem tłowym ( $x, y$ ). Aby przejść ze współrzędnych przestrzennych (wprowadzanych przy przemieszczaniu znacznika pomiarowego przez operatora) i obliczanych na

ich podstawie współrzędnych tłowych - należy określić zależność pomiędzy układem tłowym zdjęcia a układem obrazu. Wymaga to określenia położenia punktu głównego zdjęcia jako początku układu i określenie orientacji osi układu. Orientację wewnętrzną wykonuje się przez pomiar znaczków tłowych na obrazie zdjęcia i wprowadzenie do pamięci komputera ich współrzędnych tłowych uzyskanych w procesie kalibracji kamery. Na tej podstawie wyznaczane są parametry transformacji układu tłowego do układu obrazu.

Następnie należy wprowadzić do autografu **elementy orientacji zewnętrznej zdjęć**. Wykonuje się to dwoma drogami. Pierwsza z nich to wyznaczenie ich w procesie aerotriangulacji (rozdz. 8), a następnie wprowadzenie do pamięci komputera autografu. Druga polega na przeprowadzeniu procedury orientacji zdjęć składającej się z orientacji wzajemnej i bezwzględnej.

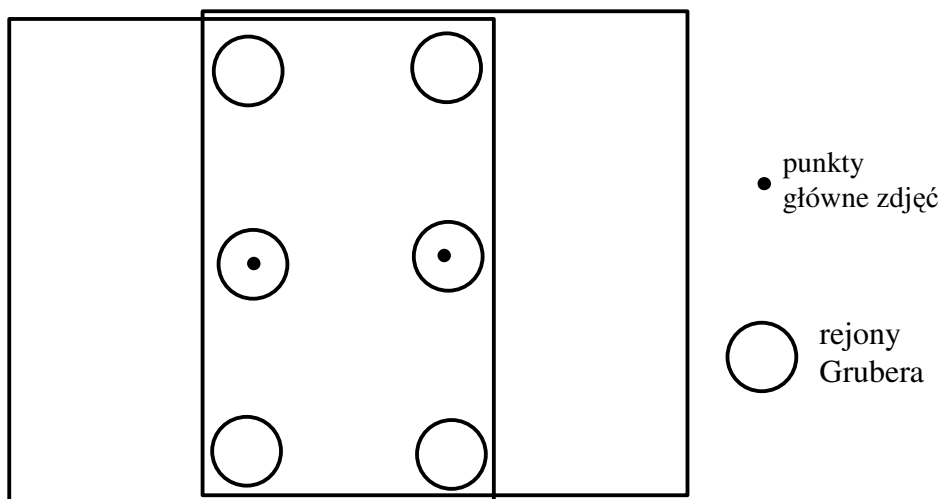
**Orientacja wzajemna** polega na odtworzeniu wzajemnego położenia zdjęć z momentu ich wykonywania bez zwracania uwagi na prawidłowość ich bezwzględnej orientacji. Orientację wzajemną zdjęć określamy za pomocą elementów orientacji wzajemnej. Stosuje się dwa systemy tych elementów:

a. Elementy kątowe obu kamer

Przyjmuje się układ współrzędnych następujący: początek - lewy środek rzutów, oś X pokrywa się z bazą zdjęć, oś Y jest prostopadła do bazy i do osi lewej kamery, oś Z jest prostopadła do X i Y. Elementy orientacji: kąty  $\varphi_L, \kappa_L, \varphi_P, \omega_P, \kappa_P$  (L - lewe zdjęcie, P - prawe, definicja  $\varphi, \omega, \kappa$  - rozdz. 3.2)

b. Elementy kąto- liniowe prawej kamery

Przyjmuje się układ współrzędnych: początek - lewy środek rzutów, oś X pokrywa się z osią x układu tłowego lewego zdjęcia, oś Y z osią y, a oś Z z osią lewej kamery. Elementy orientacji:  $\varphi_P, \omega_P, \kappa_P$ , oraz składowe bazy BY, i BZ przy ustalonym (dowolnie) BX.



Rys. 7.3 Rozmieszczenie punktów do orientacji wzajemnej stereogramu zdjęć lotniczych

Zasada wykonania orientacji wzajemnej polega na takim ustawieniu zdjęć względem siebie, aby wszystkie promienie jednoimienne przecinały się (taka sytuacja zachodziła w momencie wykonywania zdjęć). Do wyznaczenia orientacji wzajemnej wystarczy pięć punktów rozmieszczonych w pięciu z sześciu rejonów Grubera (rys. 7.3), ale z reguły stosuje się sześć punktów lub ich wielokrotność. Po pomierzeniu punktów wylicza się wartości elementów orientacji.



Po wykonaniu orientacji wzajemnej można utworzyć model, czyli wyliczyć współrzędne przestrzenne punktów pomierzonych na zdjęciach w układzie współrzędnych takim, w jakim zdefiniowane są elementy orientacji wzajemnej (patrz wyżej). Ponadto model ten zbudowany będzie w jakiejś nieznannej skali, ponieważ o skali decyduje długość bazy zdjęć, a ta została przyjęta dowolnie (właściwa nie jest na razie znana). Aby zbudować model w prawidłowej skali i uzyskać współrzędne punktów w terenowym układzie współrzędnych należy wykonać orientację bezwzględną

**Orientacja bezwzględna** polega na wykonaniu transformacji z układu modelu do układu terenowego. Opisać ją można wzorem:

$$\mathbf{R}_T = \mathbf{R}_S + k_m * \mathbf{A}_m * \mathbf{R}_m \quad (7.1)$$

gdzie:  $\mathbf{R}_T$  - wektor współrzędnych w układzie terenowym

$\mathbf{R}_m$  - wektor współrzędnych w układzie modelu

$\mathbf{R}_S$  - wektor przesunięcia między układami

$\mathbf{A}_m$  - macierz obrotów układu modelu do układu terenowego

$k_m$  - współczynnik skali: układ modelu / układ terenowy

Do wykonania orientacji bezwzględnej potrzebne są tzw. fotopunkty, czyli odfotografowane na zdjęciach punkty o znanych współrzędnych w układzie terenowym. Do jednoznacznego rozwiązania wystarczą trzy, ale byłoby to rozwiązanie bez możliwości kontroli, stosuje się zatem więcej - cztery lub najczęściej sześć fotopunktów rozmieszczonych podobnie jak punkty do orientacji wzajemnej.

**Po wykonaniu orientacji wewnętrznej, wzajemnej i bezwzględnej, albo po wykonaniu orientacji wewnętrznej i wprowadzeniu znanych z aerotriangulacji elementów orientacji zewnętrznej zdjęć, model w autografie jest przygotowany do pomiaru. Mierząc punkty na modelu otrzymamy wówczas od razu ich współrzędne terenowe.**

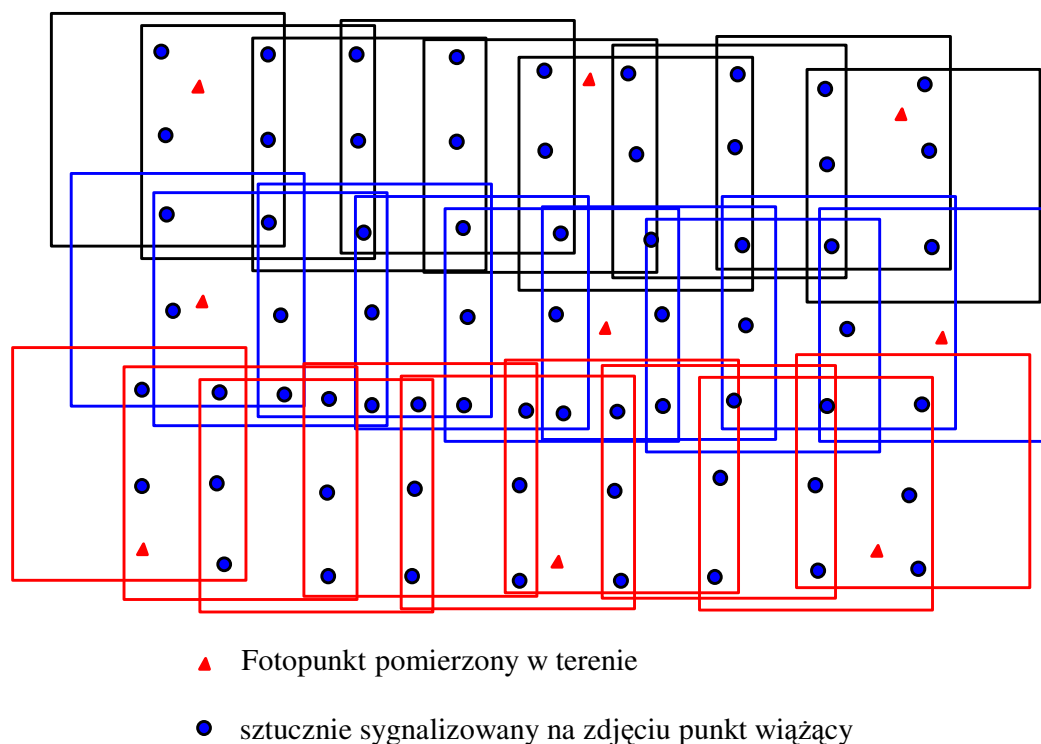
## 8. Osnowa do opracowania fotogrametrycznych zdjęć lotniczych

Przy opracowywaniu zdjęć na autografie konieczna jest znajomość elementów orientacji zewnętrznej zdjęć. Jeśli nie są znane elementy orientacji zewnętrznej należy posiadać na opracowywanym stereogramie fotopunkty, czyli odfotografowane punkty o znanych współrzędnych w układzie terenowym. Fotopunkty są to albo zasygnalizowane przed nalotem (najczęściej znakami w kształcie krzyża) punkty o znanych współrzędnych, albo wyraźne szczegóły terenowe których położenie w terenie mierzy się dopiero po ich zidentyfikowaniu na zdjęciach.

Jeśli opracowywana jest większa ilość stereogramów to ilość potrzebnych fotopunktów będzie bardzo duża. Pomiar, i ewentualna wcześniejsza sygnalizacja tak wielu fotopunktów wiąże się z dużymi kosztami. Dlatego też opracowano kameralną metodę wyznaczania fotopunktów zwaną aerotriangulacją. Korzysta się w niej ze znacznie mniejszej ilości punktów, których współrzędne wyznaczane są poprzez pomiar terenowy. Dodatkowo wykorzystuje się tzw. punkty wiążące, czyli szczegóły terenowe lub punkty sztucznie sygnalizowane na zdjęciach w pasach potrójnego pokrycia zdjęć oraz pasach pokrycia pomiędzy szeregami.

Wszystkie wymienione punkty mierzy się na zdjęciach. Następnie w procesie obliczeń polegającym na stworzeniu układu równań (np. równań kolinearności 3.7) opisujących poszczególne punkty pomierzone na wielu zdjęciach rozwiązaniu tego układu, wyznacza się terenowe współrzędne wszystkich pomierzonych punktów wiążących. Fotopunkty o wyznaczonych poprzez pomiar w terenie współrzędnych służą do wpasowania utworzonego bloku zdjęć w terenowy układ współrzędnych.

Oprócz wyznaczenia terenowych współrzędnych punktów wiążących oblicza się elementy orientacji zewnętrznej poszczególnych zdjęć.



Rys. 8.1 Przykład rozmieszczenia punktów do aerotriangulacji

## 9. Procedura opracowania map kreskowych na podstawie zdjęć lotniczych

Etapy procedury:

- Projekt wykonania zdjęć. Projektuje się przede wszystkim skalę zdjęć wybiera rodzaj kamery którą wykonane zostaną zdjęcia oraz projektuje linie wzdłuż których samolot będzie leciał. Skala zdjęć jest przeważnie dwa do pięć (maksymalnie sześć) razy mniejsza od skali mapy która ma zostać opracowana.
- Projekt sygnalizacji i pomiaru fotopunktów. Wykonuje się go jeżeli fotopunkty są sygnalizowane przed nalotem.
- Wykonanie sygnalizacji i pomiaru fotopunktów - opcjonalnie. Wykonanie zdjęć.

- Projekt aerotriangulacji oraz jeżeli fotopunkty nie zostały zasygnalizowane przed nalotem pomiar fotopunktów jako szczegółów zidentyfikowanych na zdjęciach. Ostatnio coraz częściej nie sygnalizuje się fotopunktów przed nalotem. Wynika to między innymi z faktu, iż wykonuje się zdjęcia przeznaczone równocześnie dla różnych celów (np. analiz planistycznych) i dopiero jeśli są one wykorzystywane do opracowania map to uzbraja się je w osnowę.
- Pomiar i obliczenie aerotriangulacji.
- Wykonanie uczytelnienia zdjęć. Powiększa się zdjęcia do skali w przybliżeniu równej skali opracowywanej mapy, a następnie idzie się z tymi zdjęciami w teren i w terenie wrysowuje się wszystkie elementy, które powinny znaleźć się na mapie, zarówno te które się odfotografowały jak i te które się nie odfotografowały bo były zasłonięte lub w momencie wykonywania zdjęć jeszcze ich nie było. Wszystkie te elementy zaznacza się znakami umownymi stosowanymi na mapie w skali opracowania. Wprowadza się na ten "brudnopis mapy" również wszystkie informacje których na zdjęciach nie da się odczytać (np. nazwy ulic; numery , ilość kondygnacji i przeznaczenie budynków itp.) Tak uczytelnione zdjęcia umożliwią szybsze opracowanie map na autografie oraz umożliwią uniknięcie błędów spowodowanych złą interpretacją rysowanych obiektów. Po uczytelnieniu zdjęć wykonuje się pomiar bezpośredni elementów niewidocznych na zdjęciach.
- Strojenie zdjęć na autografach, a następnie zrysowanie z modeli treści mapy (budynki rysuje się np. po dachach bo nie widać ich styku z terenem).
- Edycja mapy, czyli uzupełnienie dodatkową treścią, znakami umownymi, ramką, opisem pozaramkowym.

## 9 Numeryczny model terenu

### 9.1 Wstęp

Numeryczny model terenu (NMT) jest to zbiór punktów opisujących kształt powierzchni terenu o znanych współrzędnych przestrzennych wraz z algorytmami umożliwiającymi uzyskanie z tych punktów obrazu powierzchni w różnych postaciach.

.....

W NMT stosuje się różne sposoby rozmieszczenia punktów tworzących model:

Regularnie rozmieszczone punkty (z reguły siatka kwadratów, prostokątów, lub trójkątów równobocznych)

Nieregularnie rozmieszczone punkty (siatka trójkątów ale o zróżnicowanych wymiarach)

Profile - punkty rozmieszczone wzdłuż linii równoległych do siebie

Warstwice - punkty rozmieszczone wzdłuż linii o jednakowych wysokościach

itd.

**Etapy** tworzenia modelu numerycznego:

zebranie informacji o kształcie powierzchni terenu dla którego tworzony jest model  
utworzenie NMT

### 9.2 Zbieranie informacji o kształcie powierzchni terenu

Źródła informacji:

pomiar bezpośredni (Total station, GPS)

pomiar fotogrametryczny

wektoryzacja istniejących map wysokościowych (z reguły topograficznych)

pomiar lotniczym skanerem laserowym

satelitarny pomiar radarowy

Najczęściej stosowane jest pozyskiwanie danych z istniejących map gdyż jest to sposób najszybszy i najtańszy. Mapy przeważnie najpierw są skanowane, a następnie na tych obrazach cyfrowych przeprowadzana jest wektoryzacja. Może ona być dokonywana ręcznie na ekranie monitora komputerowego lub automatycznie. Po automatycznej wektoryzacji konieczna jest kontrola i poprawienie wektoryzacji gdyż z powodu niejasności rysunku (błędy rysunku np. dotyknięcie się linii warstwic lub przerwy w ciągłości linii; uszkodzenia rysunku mapy; przerwy w liniach warstwic na opis ich wysokości itp.) linie warstwic zwektoryzowane są nieraz błędnie. Metoda ta ma dwie wady. Po pierwsze musimy zaufać wykonawcom map, że zostały dobrze je wykonali, a z tym bywało różnie, po drugie obraz powierzchni terenu na mapie jest już zgeneralizowany i tworząc model dokonamy powtórnej jego generalizacji. Wykorzystanie istniejących map jest dobrym rozwiązaniem w przypadku jeśli tworzony model nie musi spełniać wysokich kryteriów dokładnościowych.

Pomiar fotogrametryczny jest rzadziej stosowany do zbierania danych dla NMT. Przy odpowiedniej skali zdjęć cechuje się wyższą dokładnością niż istniejące mapy topograficzne, ale

jego wykorzystanie jest bardziej pracochłonne. Stosowany jest w tych miejscach gdzie brak map topograficznych o wystarczającej dokładności przedstawienia rzeźby terenu i w opracowaniach w których model musi spełniać wysokie kryteria dokładnościowe.

Zbieranie danych poprzez bezpośredni pomiar jest rozwiązaniem pracochłonnym i stosowanym jedynie przy opracowywaniu modelu o wysokiej dokładności na małym obszarze lub w miejscach gdzie nie da się wykonać pomiaru fotogrametrycznego ( np. lasy) a nie ma map wysokościowych o wystarczającej dokładności.

Pomiar lotniczym skanerem laserowym jest metodą szybką, dokładną (błąd określenia położenia mierzonego punktu  $\geq \pm 0.15$  m.) ale metodą dość drogą. Poza tym skaner mierzy powierzchnię terenu wraz z pokryciem (budynki, drzewa) dlatego, aby uzyskać tylko powierzchnię terenu trzeba wyniki pomiaru odpowiednio przefiltrować (co jest zagadnieniem nie całkiem prostym)

Pomiar za pomocą odpowiednich sensorów radarowych umieszczonych na satelitach daje model o niezbyt wysokiej dokładności.

W zależności od zastosowanej metody zbierania danych różne będzie rozmieszczenie punktów pomiarowych. Po wektoryzacji map punkty będą rozmieszczone w ciągach wzdłuż warstwic, w metodzie fotogrametrycznej albo w postaci przekrojów lub w miarę regularnej siatki, przy pomiarach bezpośrednich będzie to przeważnie zbiór punktów rozproszonych. Ponadto dane te muszą zostać uzupełnione: punktami charakterystycznymi terenu (wierzchołki wzniesień, dna lokalnych niecek); liniami szkieletowymi (linie grzbietowe i ciekowe); liniami strukturalnymi (krawędzie skarp, urwisk), liniami wyłączeń (obszary na których nie tworzy się NMT np. powierzchnia wody - jeziora, morza; lasy jeśli nie ma dla nich danych).

### 9.3 Tworzenie NMT

Dane opisujące kształt powierzchni terenu zebrane w pierwszym etapie nie stanowią jeszcze NMT ponieważ nie są przygotowane do szybkiej interpolacji wysokości dowolnie rozmieszczonych punktów. Należy dopiero dokonać właściwego utworzenia NMT, którego przebieg zależy od docelowego sposobu rozmieszczenia punktów modelu.

Najczęściej stosowanym rozmieszczeniem punktów jest regularna siatka kwadratów lub prostokątów. Jej zaletą jest zmniejszenie ilości przechowywanych informacji gdyż nie trzeba pamiętać współrzędnych X i Y wierzchołków siatki lecz tylko przepis na ich uzyskanie. Proste są również algorytmy interpolacji wysokości z takiej siatki. Wadą jej są trudności w dostosowaniu do zmiennych kształtów terenu. Jeśli na obszarze modelu występuje równocześnie teren mało i mocno zróżnicowany to odpowiednio gęsta siatka odpowiednia dla zróżnicowanych form terenu będzie niepotrzebnie zbyt gęsta dla obszarów płaskich i odwrotnie. Niektóre programy do budowy NMT umożliwiają różnicowanie gęstości siatki w różnych miejscach modelu. Utworzenie NMT o regularnej siatce polega więc na wykonaniu interpolacji wysokości wierzchołków siatki na podstawie zbioru punktów pomiarowych. Po tej interpolacji do dalszych działań wykorzystuje się jedynie wierzchołki siatki uzupełnione ewentualnie o linie szkieletowe, strukturalne, i obszary wyłączeń.

Ostatnio coraz częściej stosuje się nieregularną siatkę trójkątów jako podstawę NMT. Jako wierzchołki trójkątów wykorzystuje się punkty pomierzone w terenie (fotogrametrycznie lub bezpośrednio). Utworzenie NMT polega wówczas na połączeniu punktów z pomiaru w trójkąty wewnątrz których następować będzie później interpolacja. Wykorzystywane są do tego specjalne algorytmy umożliwiające tworzenie trójkątów z najbliższych sobie punktów. Metoda siatki nieregularnej wymaga zapamiętania wszystkich współrzędnych wszystkich punktów, a algorytmy interpolacji są bardziej skomplikowane niż przy siatce regularnej. Dużą zaletą tej metody jest

możliwość bardzo dobrego dopasowania punktów modelu do kształtu opisywanego terenu.

## 9.4 Metody interpolacji w NMT

Musimy rozróżnić interpolację w celu utworzenia NMT oraz interpolację wysokości punktu o dowolnym położeniu na podstawie NMT.

Interpolacja wysokości na podstawie NMT zależy od tego jak wygląda rozmieszczenie punktów tworzących NMT. W przypadku regularnej siatki interpoluje się na podstawie czterech wierzchołków oczka siatki biorąc ewentualnie pod uwagę sąsiednie oczka siatki oraz punkty i linie charakterystyczne wewnątrz oczka. Przy siatce nieregularnej powierzchnię trójkąta traktuje się jako płaszczyznę i na tej podstawie interpoluje się wysokość.

Przy interpolacji wysokości wierzchołków oczek siatki regularnej korzysta się ze zbioru punktów nieregularnie rozmieszczonych.

Pierwszym problemem jest wybór ilości punktów do interpolacji. Stosowane są różne zasady. Jedna z nich polega na wyborze określonej ilości punktów najbliższych położonych. Druga na wyborze wszystkich punktów położonych w okręgu o zadanym promieniu. Obie te metody mają swoje wady i dają niezbyt dobre wyniki jeżeli rozmieszczenie punktów pomiarowych jest z jednej strony interpolowanego wierzchołka znacznie rzadsze niż z drugiej (np. w miejscu zmiany kształtu terenu z płaskiego na mocno pofalowany). Stosuje się wówczas podział otoczenia interpolowanego wierzchołka na cztery strefy i przyjmuje się zasadę że w każdej strefie do interpolacji bierze się taką samą ilość punktów.

Innym problemem jest wybór metody interpolacji wysokości. Jedna z najprostszych nosi nazwę metody odwrotnej odległości. Wysokość interpolowanego punktu jest wówczas średnią ważoną przy czym waga jest odwrotnością odległości do punktów pomiarowych.

$$Z_p = \frac{\sum (Z_i * \frac{1}{d_i})}{\sum \frac{1}{d_i}} \quad (\text{waga} = 1/d)$$

Inne metody polegają na wykorzystaniu np. funkcji wielomianowych, funkcji sklepanych, metody krigingu czy też elementów skończonych (podział zbioru punktów na trójkąty i traktowanie ich jako płaszczyzny).

## 9.5 Zastosowania NMT

Na podstawie NMT można generować: mapy warstwiczne, przekroje, widoki trójwymiarowe z różnych punktów przestrzeni, obliczać objętości i wysokości punktów o zadanych współrzędnych itp. Ma to zastosowanie w produkcji map wysokościowych, ortofotomap, analizach przy projektowaniu różnych inwestycji (np. przekroje wzdłuż projektowanych linii, widoki perspektywiczne z wybranych punktów, obliczenia objętości robót ziemnych), w górnictwie, w systemach informacji przestrzennej i geograficznych systemach informacji, sterowaniu pocisków samosterujących itp.

## **10. Zastosowania fotogrametrii**

### **10.1 Fotogrametria lotnicza**

Główne zastosowanie fotogrametrii lotniczej to opracowywanie różnego rodzaju map wektorowych, ortofotomap, oraz pomiar danych do numerycznego modelu terenu. Opracowania fotogrametryczne są często wykorzystywane do aktualizacji map topograficznych oraz do aktualizacji map ewidencyjnych. Numeryczny model terenu fotogrametrycznie opracowuje się bardzo często dla wykonania ortofotomap, dla systemów informacji przestrzennej, a także dla projektów technicznych dużych budow np. autostrad.

### **10.2 Fotogrametria naziemna**

Fotogrametria naziemna wykorzystywana jest bardzo często do opracowań architektonicznych. Na podstawie zdjęć fotogrametrycznych opracowuje się przekroje i rzuty i rysunki elewacji różnych obiektów, zwłaszcza obiektów trudnodostępnych o skomplikowanych kształtach lub będących w ruinie. Niezastąpione jest zastosowanie fotogrametrii cyfrowej do wykonania fotoplanów elewacji ścian i murów o skomplikowanym rysunku (np. pokrytych malowidłami lub zbudowanych z nieregularnych kamieni) oraz do wykonywania rozwinięć malowideł pokrywających sklepienia które nie są płaszczyznami (np. kolebkowe, kopuły itp).

Innym częstym zastosowaniem fotogrametrii naziemnej jest badanie kształtu, i odkształceń, obiektów inżynierskich np. kominów, wież wyciągowych w kopalniach, wież wiertniczych, słupów w halach fabrycznych, wysokich budynków itp. Fotogrametrię naziemną stosuje się też do wyznaczania wielkości urobku w kopalniach odkrywkowych, zwłaszcza tych dużych, gdyż pomiar geodezyjny wymaga tam dużej ilości pracowników.

Wymieniono tutaj jedynie najbardziej częste zastosowania fotogrametrii.