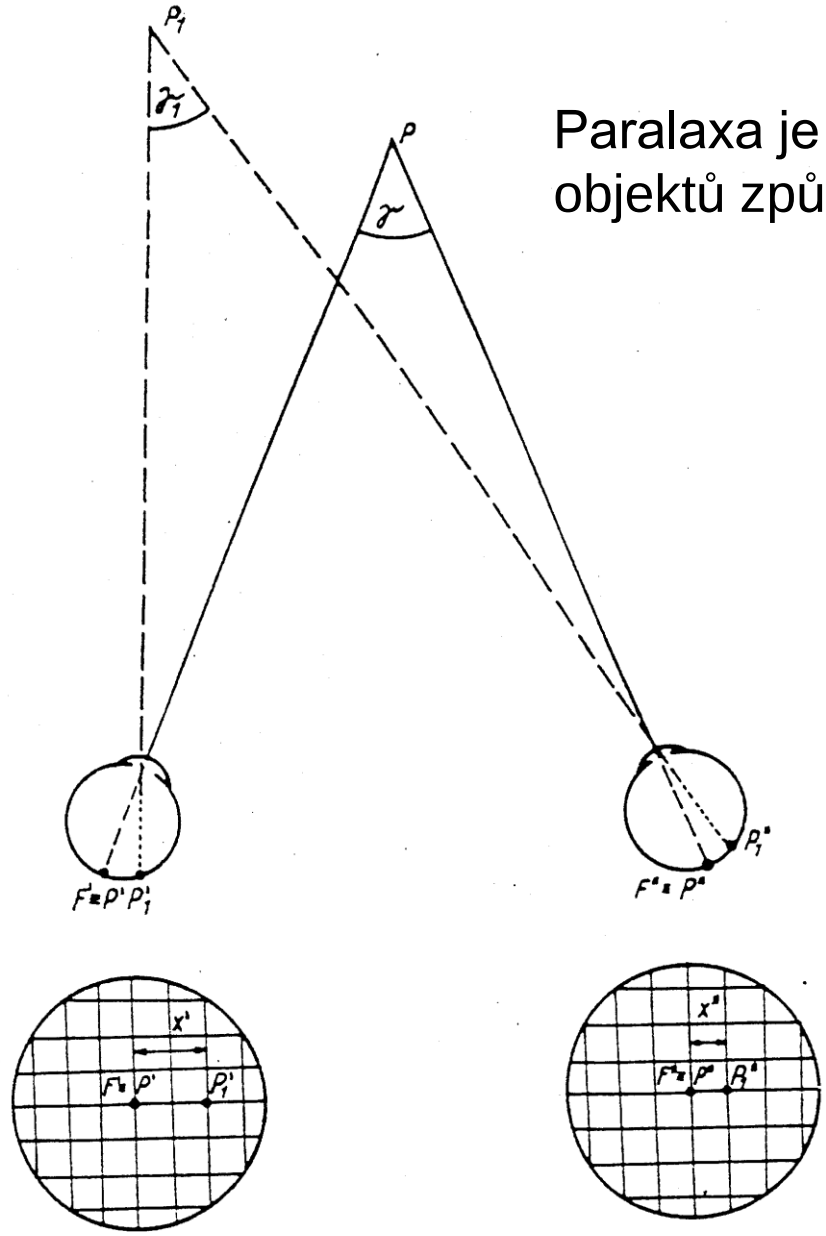
Stereofotogrammetrie

Princip stereoskopického vidění a tzv. fyziologické paralaxy



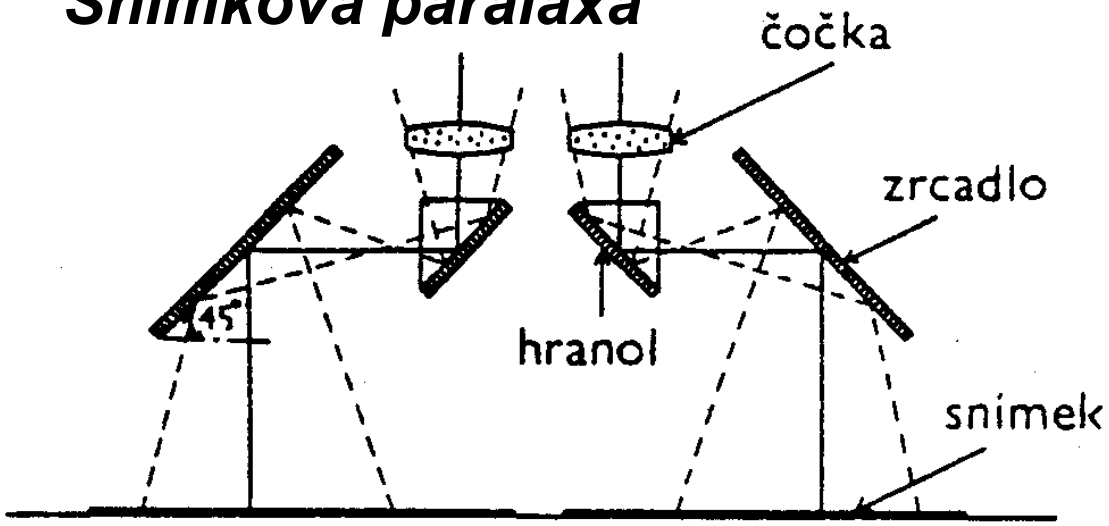
Paralaxa je relativní změna v poloze stacionárních objektů způsobená změnou v geometrii pohledu.

horizontální fyziologická paralaxa

$$p = x' - x''$$

vertikální paralaxa q

Snímková paralaxa



Pseudoefekt – změní-li se smysl paralax - stereomodel s inverzním reliéfem.

Snímková paralaxa

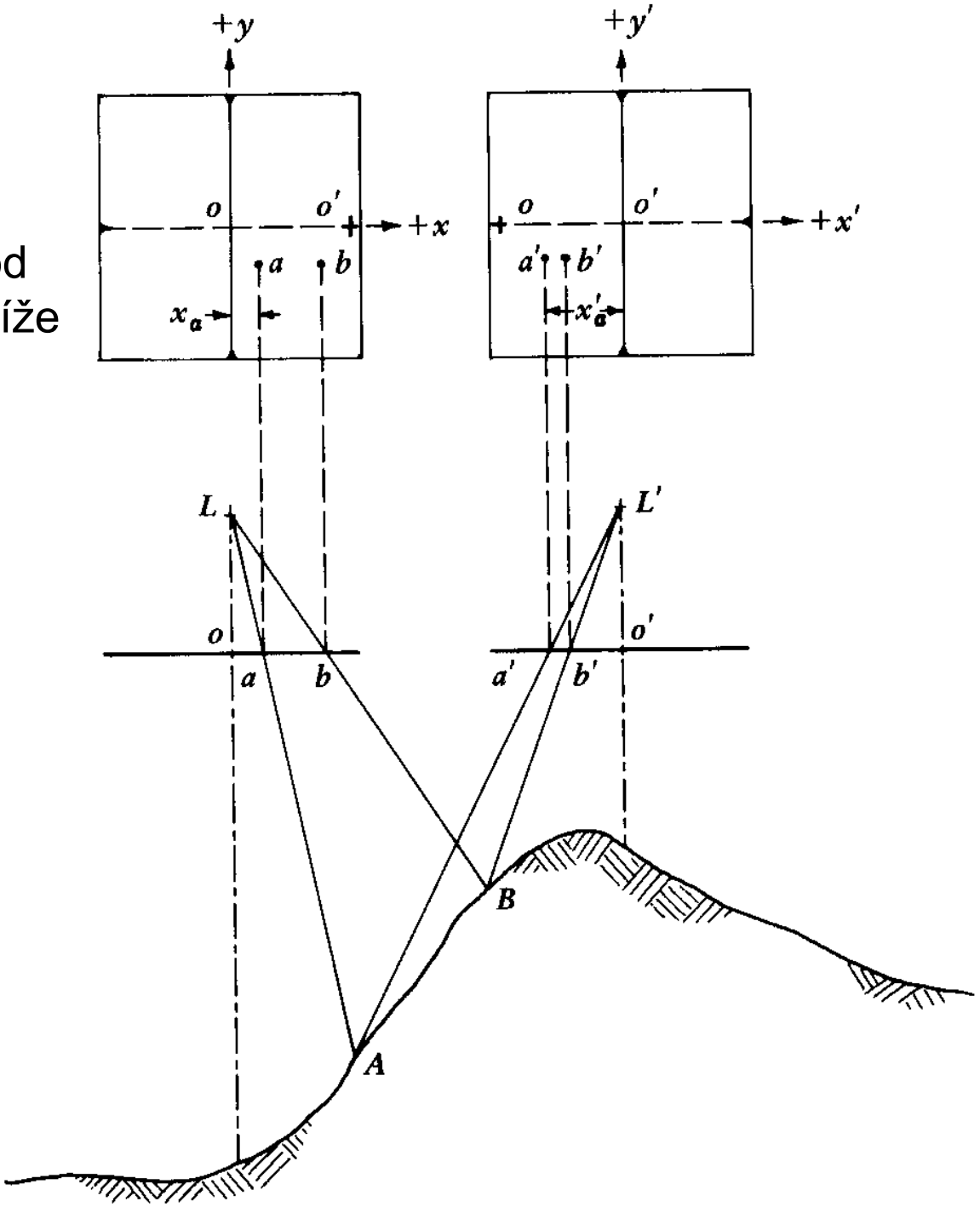
Změna v poloze je nepřímo úměrná vzdálenosti objektu od místa pozorování. (bod A je níže – dále)

Horizontálních paralax lze využít ke zjišťování výšky objektů.

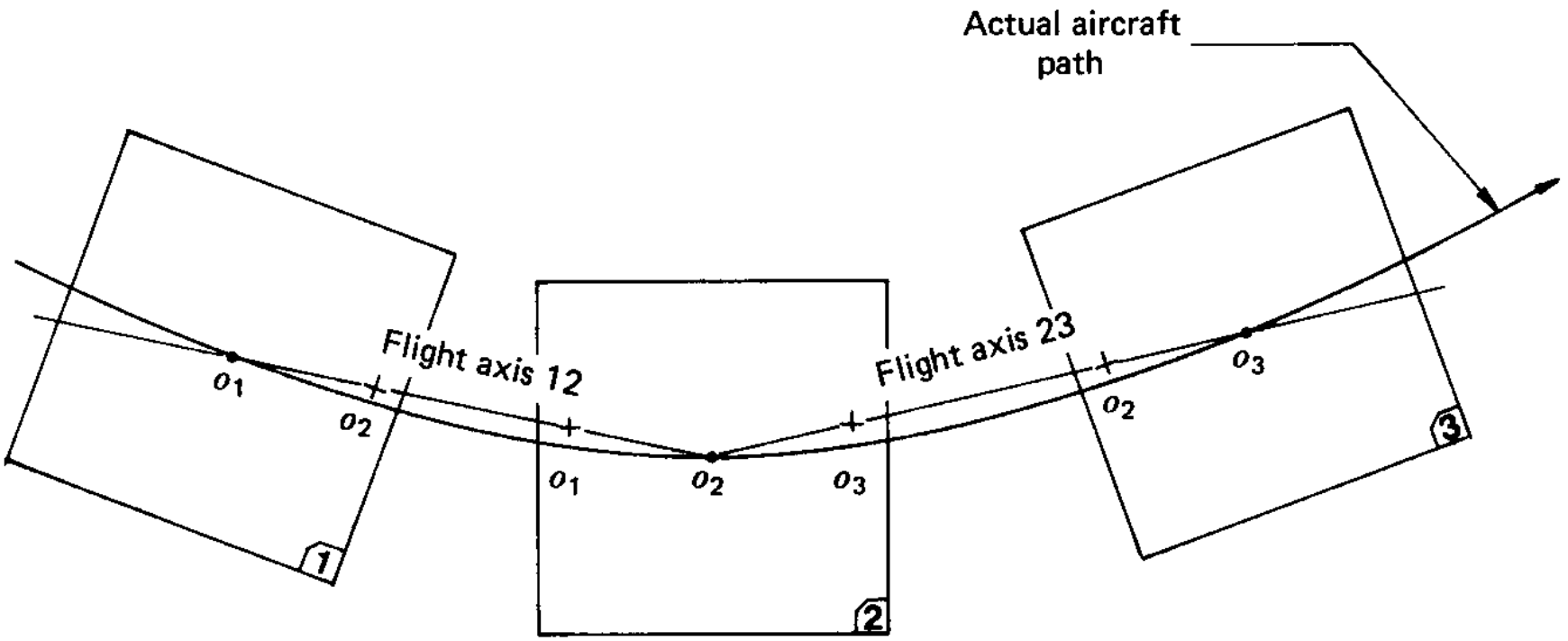
$$p_a = x_a - x_a^{'}$$

$$p_b = x_b - x_b^{'}$$

$$p_a < p_b$$



Určení osy letu na sousedních fotografiích stereopáru

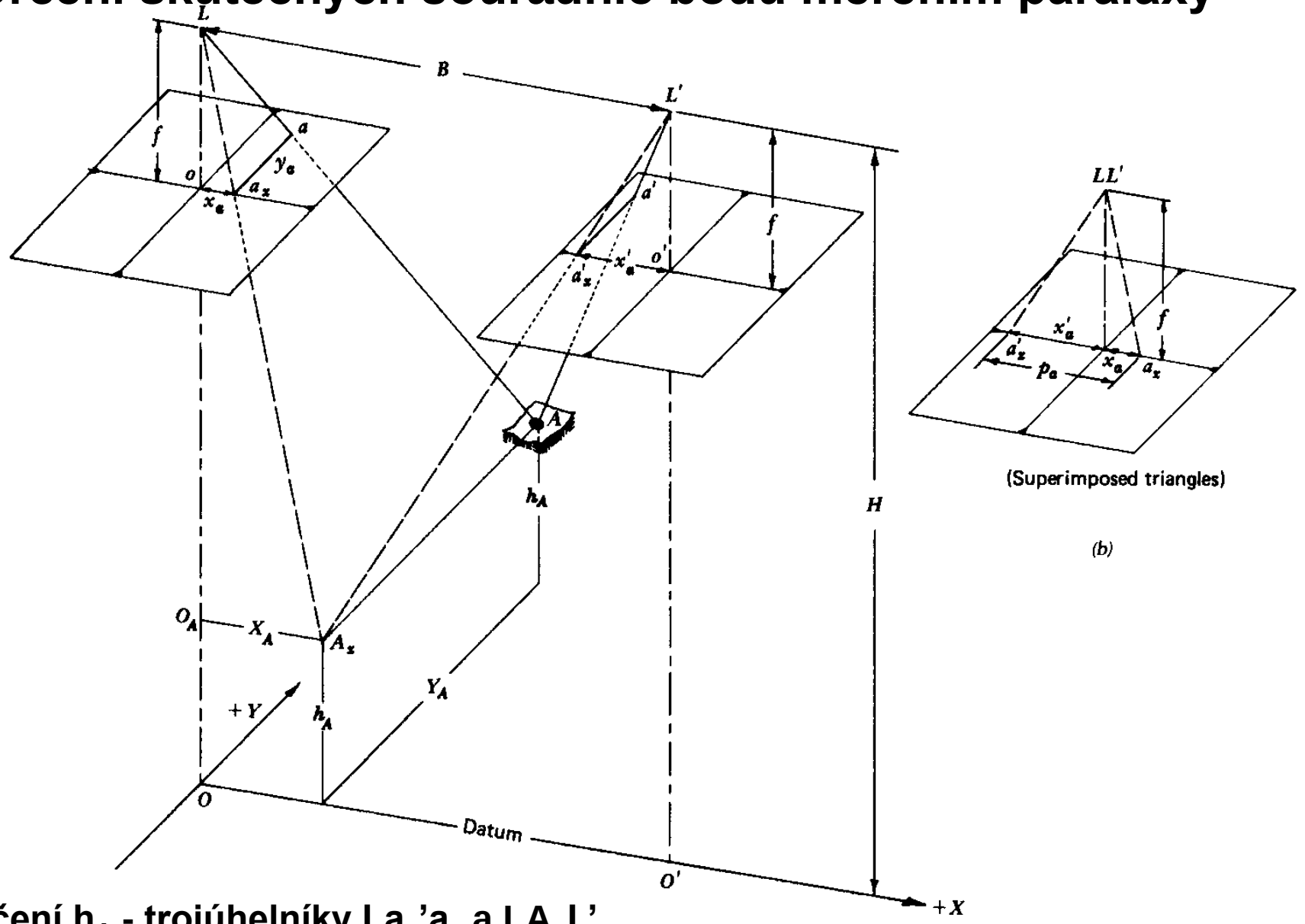


Zdánlivá změna v poloze objektů vznikající v důsledku paralaxy je vždy rovnoběžná s linií letu.

Osa letu potom definuje pro každý stereopár základnu pro měření paralaxy.

Orientování snímkové dvojice je nutné k odstranění vertikálních paralax.

Určení skutečných souřadnic bodu měřením paralaxy



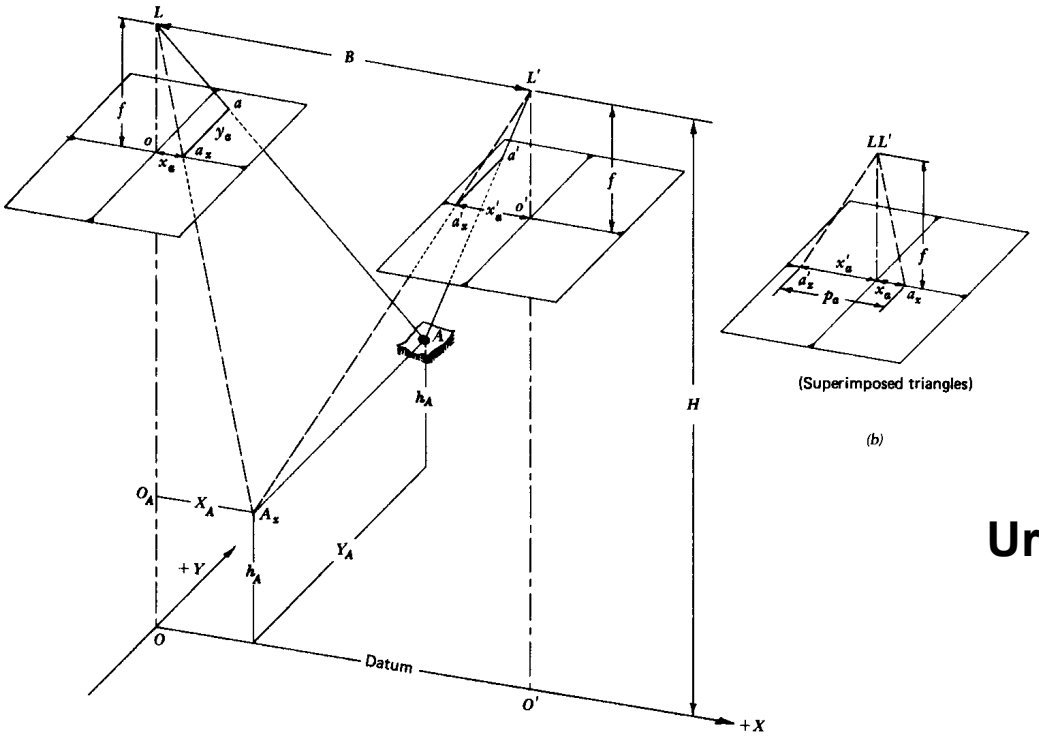
(Superimposed triangles)

(b)

Určení h_A - trojúhelníky $La_x'a_x$ a LA_XL'.

Určení X_A - LO_AA_X a Loa_x

Určení skutečných souřadnic bodu měřením paralaxy



$$\frac{p_a}{f} = \frac{B}{H - h_A}$$

$$H - h_A = \frac{B \cdot f}{p_a}$$

Určení výšky bodu A:

$$h_A = H - \frac{B \cdot f}{p_a}$$

Určení h_A - trojúhelníky $La_x'a_x$ a LA_XL'

Určení X_A - LO_AA_X a Loa_x

$$\frac{X_A}{H - h_A} = \frac{x_a}{f} \quad \rightarrow \quad X_A = \frac{x_a\left(H - h_A\right)}{f} \quad \rightarrow \quad X_A = B \cdot \frac{x_a}{p_a}$$

Obdobně pro Y-ovou souřadnici bodu A . . .

Paralaktické rovnice

Určení výšky bodu A potom platí: $$h_A = H - \frac{B \cdot f}{p_a}$$

X- ová a Y- ová souřadnice bodu A: $$X_A = B \cdot \frac{x_a}{p_a}$$

$$Y_A = B \cdot \frac{y_a}{p_a}$$

X a Y - skutečné souřadnice bodu v systému souřadnic s počátkem v hlavním bodě levé fotografie

x, y - snímkové souřadnice bodu na levém snímku

osa x je kladná ve směru letu

p –paralaxa

Uvedené vztahy platí pro tzv. normální případ – osy záběru jsou rovnoběžné

Relativní převýšení dvou bodů

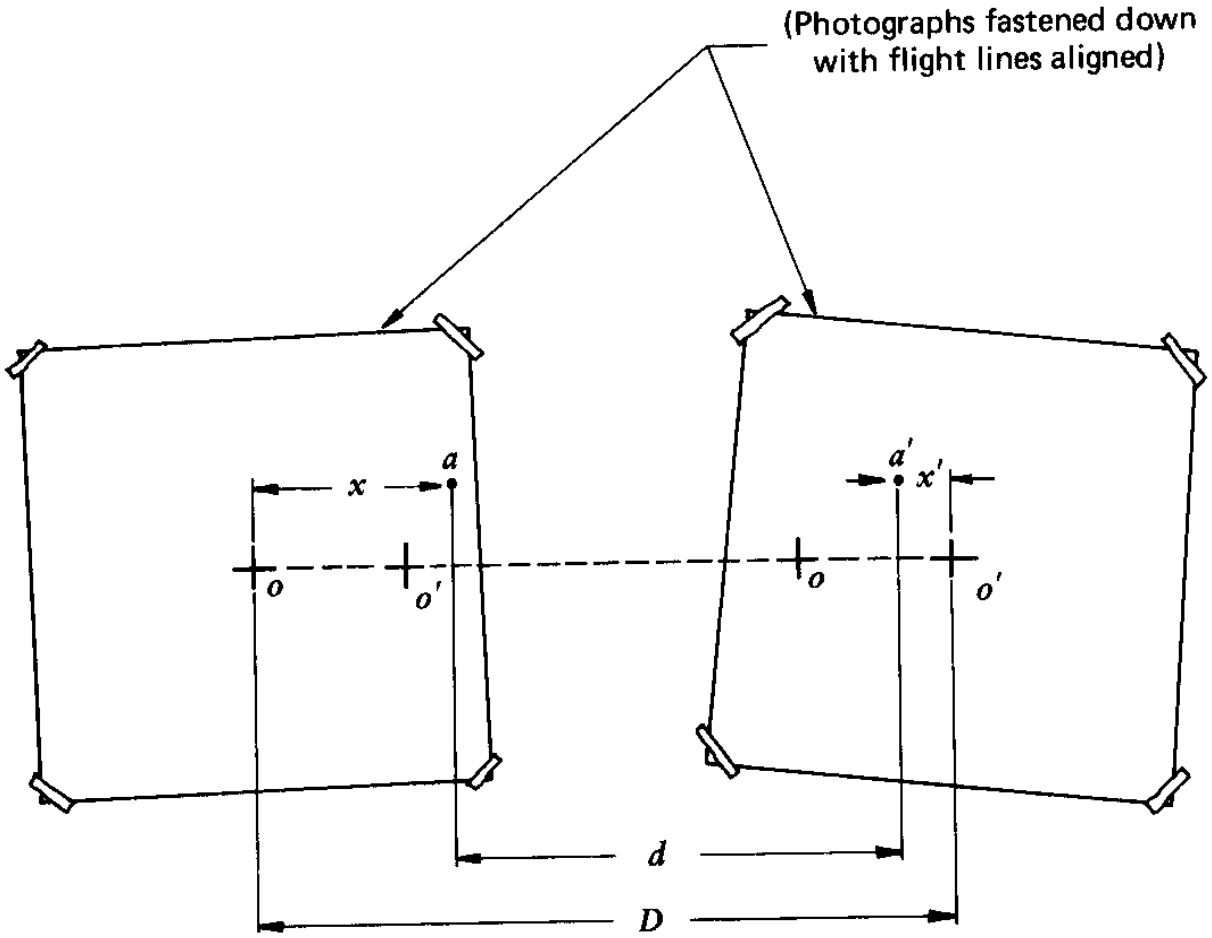
$$\Delta h = \frac{\Delta p \cdot H'}{p_a}$$

Δh - rozdíl výšek mezi dvěma body, jejichž rozdíl paralax je Δp

H’ - výška letu nad nižším bodem

p_a - paralaxa vyššího bodu.

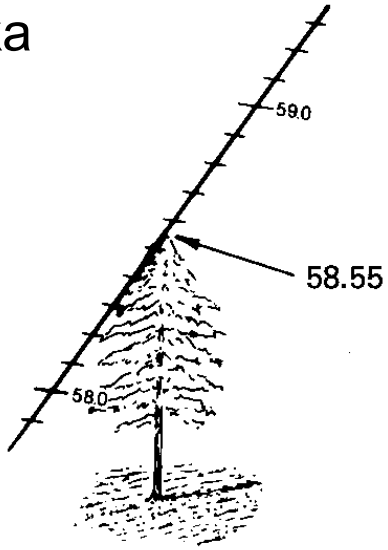
Měření paralaxy na snímcích



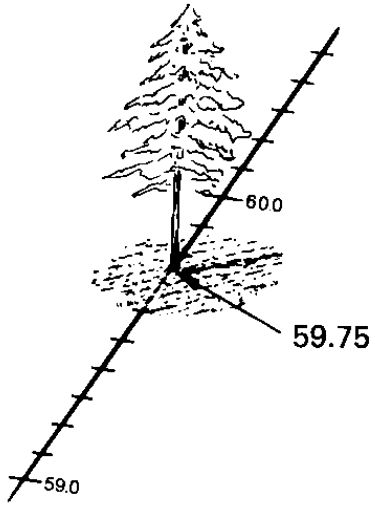
$$p = x - x' = D - d$$

Měření paralaxy v analogové fotogrammetrii:

- paralaktická pravítka
- stereometr



(a)



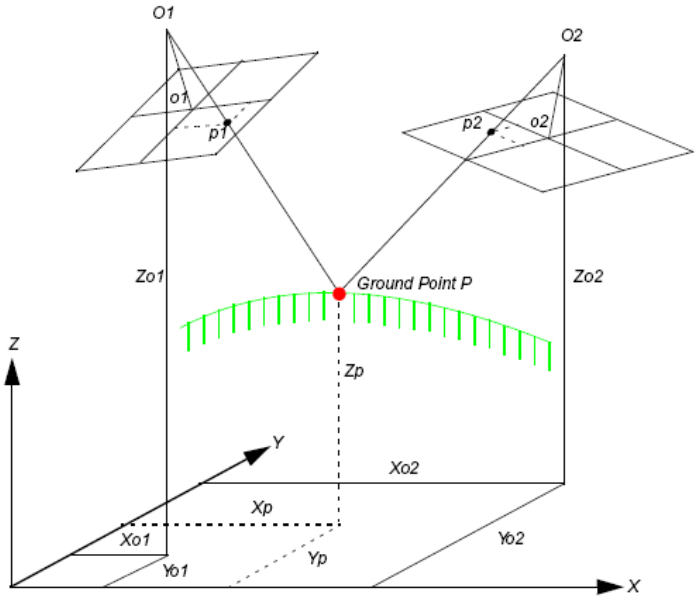
(b)

Měření paralaxy v digitální fotogrammetrii:

- obrazová korelace

Stereofotogrammetrie a orientace snímkové dvojice

Vnější orientace stereopáru



Prvky vnější orientace (PVO) jsou známy

1. přímé určení PVO (např. pomocí GPS)
2. využití kolineárních rovnic

$$k_x$$

$$X = X_o + (Z - Z_O)\frac{m_{11}(x' - x'o) + m_{12}(y' - y'o) + m_{13}(-f)}{m_{31}(x' - x'o) + m_{32}(y' - y'o) + m_{33}(-f)}$$

$$Y = Y_o + (Z - Z_O)\frac{m_{21}(x' - x'o) + m_{22}(y' - y'o) + m_{23}(-f)}{m_{31}(x' - x'o) + m_{32}(y' - y'o) + m_{33}(-f)}$$

Využití kolineárních rovnic

Změříme snímkové souřadnice *x1'*, *y1'* a *x2'*, *y2'* určovaného bodu na obou snímcích.

Pro libovolný bod s neznámými skutečnými souřadnicemi *X*, *Y*, *Z* můžeme sestavit čtyři rovnice

$$X = X_{01} + (Z - Z_{01})k_{x1}$$

$$Y = Y_{01} + (Z - Z_{01})k_{y1}$$

$$X = X_{02} + (Z - Z_{02})k_{x2}$$

$$Y = Y_{02} + (Z - Z_{02})k_{y2}$$

souřadnici Z vypočteme z 1. a 3. rovnice

$$Z = \frac{X_{02} - Z_{02}k_{x2} + Z_{01}k_{x1} - X_{01}}{k_{x1} - k_{x2}}$$

Prvky vnější orientace nejsou známy

- určení prvků vnější orientace **samostatně** pro každý snímek (space resection)
- určení prvků vnější orientace **společně** pro oba snímky (space forward intersection)
- určení prvků vnější orientace **ve dvou krocích**: relativní a absolutní orientace

1. Určení prvků vnější orientace samostatně pro každý snímek

Analogicky jednosnímkovým metodám – min. 3 vlícovací body na každém snímku.

Pro každý bod - 2 kolineární rovnice pro x, y.

Tyto snímkové souřadnice jsou funkcí šesti neznámých prvků vnější orientace:

$$x = f(X_O, Y_O, Z_O, \omega, \varphi, \kappa)$$

$$y = f(X_O, Y_O, Z_O, \omega, \varphi, \kappa)$$

Řešíme soustavu šesti rovnic pro šest neznámých parametrů vnější orientace.

Nevýhoda – body musejí být úplné (X,Y,Z) a pro více snímků je jich zapotřebí mnoho

2. Určení prvků vnější orientace společně pro oba snímky

V případě stereopáru můžeme sestavit pro jeden úplný vlícovací bod 4 rovnice:

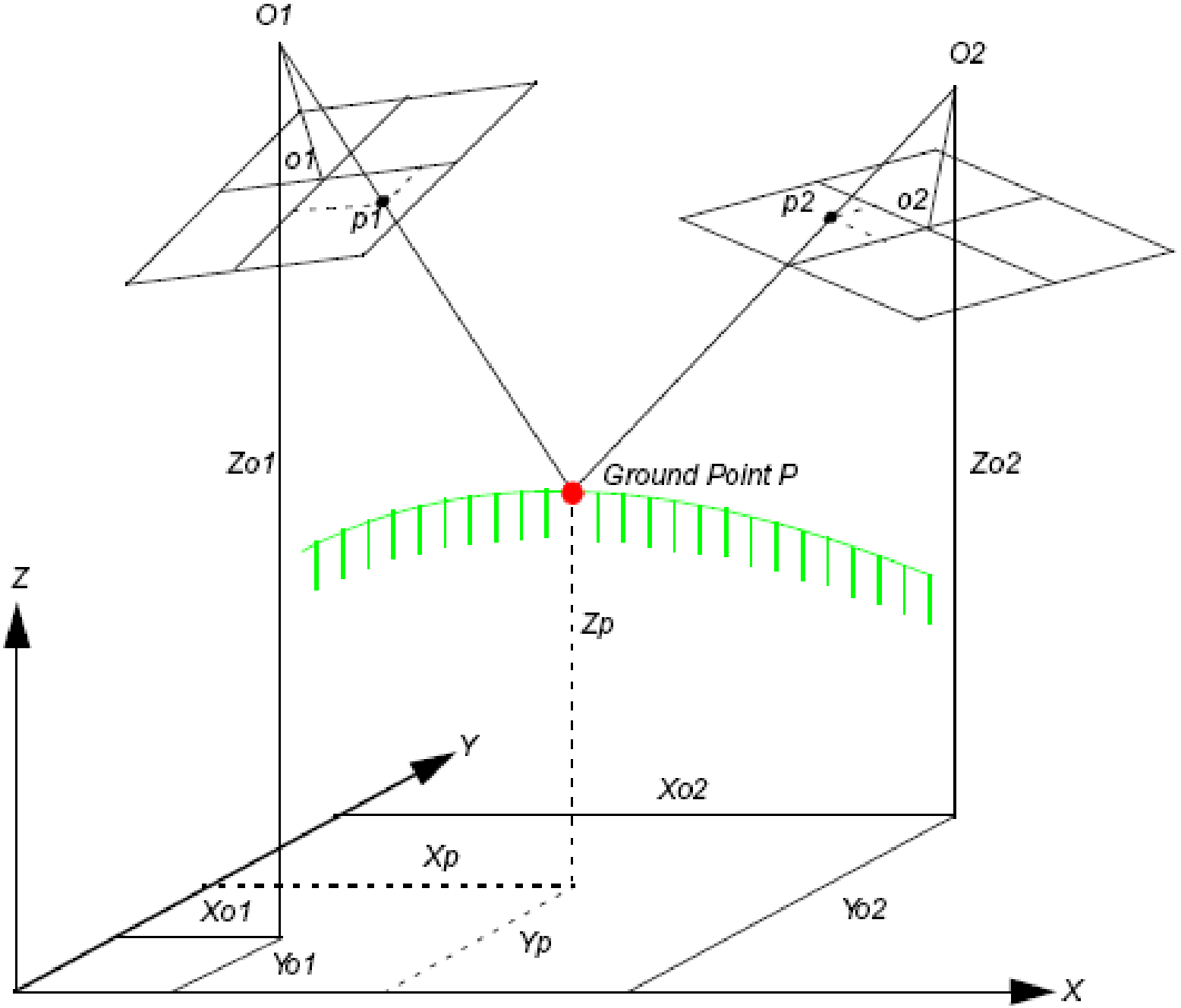
$$x_1 = f(X_{O1}, Y_{O1}, Z_{O1}, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1)$$
$$y_1 = f(X_{O1}, Y_{O1}, Z_{O1}, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1)$$
$$x_2 = f(X_{O2}, Y_{O2}, Z_{O2}, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2)$$
$$y_2 = f(X_{O2}, Y_{O2}, Z_{O2}, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2)$$

Pro libovolný určovaný bod potom lze sestavit opět 4 rovnice, kde však jsou navíc tři neznámé (X_p, Y_p, Z_p):

$$x_1 = f(X_{O1}, Y_{O1}, Z_{O1}, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1, X_P, Y_P, Z_P)$$
$$y_1 = f(X_{O1}, Y_{O1}, Z_{O1}, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1, X_P, Y_P, Z_P)$$
$$x_2 = f(X_{O2}, Y_{O2}, Z_{O2}, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2, X_P, Y_P, Z_P)$$
$$y_2 = f(X_{O2}, Y_{O2}, Z_{O2}, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2, X_P, Y_P, Z_P)$$

Soustava s velkým počtem nadbytečných rovnic – vyrovnání MNČ

Prostorové protínání vpřed



Příklad

Máme k dispozici jeden úplný vlícovací bod, 2 body neúplné (známe jen x,y) a další dva neúplné body, (kde známe pouze z). Určujeme souřadnice pěti nových bodů.

Počet neznámých:	2 * 6 prvků vnější orientace
	5 * 3 souřadnic určovaných bodů
	2 * 1 a 2 * 2 neznámých souřadnic vlíc. bodů
Celkem:	**33 neznámých**
Počet rovnic:	5 + 5 tj. 10 bodů krát 4 rovnice pro každý z nich
	tj. **40 rovnic**

Výhody - menší počet vlícovacích bodů, lze použít i tzv. neúplné body.

3. Určení prvků vnější orientace ve dvou krocích: relativní a absolutní orientace

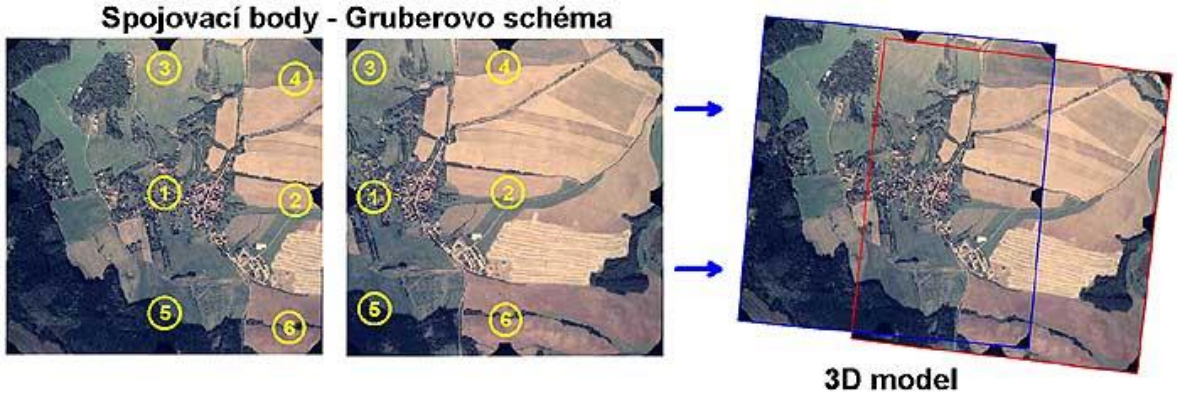
• **Relativní orientací** se vytvoří libovolně prostorově orientovaný stereomodel.

• Ten je následně transformován pomocí vlícovacích bodů tzv. **absolutní orientací** (pootočením, posunem a změnou měřítka) do gedetického souřadného systému.

• Pro orientaci dvojice snímků potřebujeme znát 12 prvků vnější orientace (dva snímky po šesti prvcích – tři souřadnice a tři úhly rotace).

• Při absolutní orientaci je určeno 7 prvků, zbývajících pět musí být určeno při orientaci relativní.

Relativní orientace



• Vzájemná orientace mezi oběma stereosnímky

• Cílem je vytvořit **stereomodel**

• Zajišťuje se rotací kolem os *x*, *y* a *z* – tedy nastavením původní pozice a úhlové orientace fotografií v době jejich expozice.

• Je určena bez vztahu k geodetickému systému souřadnic, nevyžaduje vlícovací body, ale body **vázací**

Relativní orientace

• Stereoskopický model vznikne tehdy, nebudou-li rušivě působit tzv. vertikální paralaxy q.

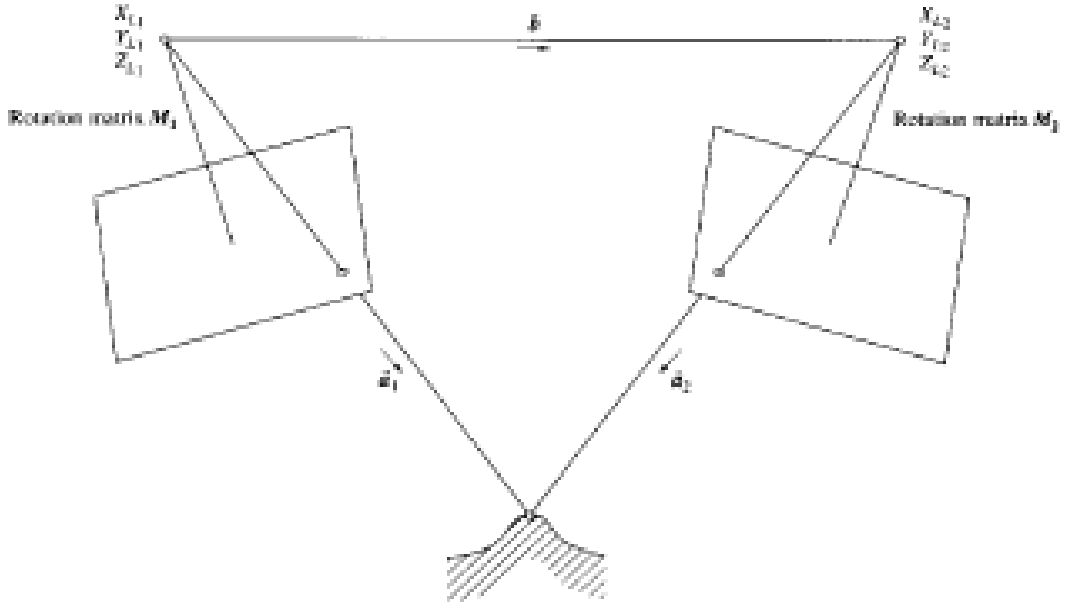
• Tedy relativní orientace modelu je dosaženo, pokud se odpovídající si paprsky (tzv. homologické) protnou alespoň v 5 bodech.

• Při určování prvků relativní orientace se vychází z různých podmínek, jejichž splnění zaručuje vyřešení relativní orientace.

• Mezi tyto podmínky patří podmínka **komplanarity** a podmínka **nulových vertikálních paralax**.

Podmínka komplanarity

Odpovídající si paprsky stereodvojice musí ležet v jedné rovině s fotogrammetrickou základnou



$$\vec{b} = \begin{bmatrix} b_X \\ b_Y \\ b_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{L_2} - X_{L_1} \\ Y_{L_2} - Y_{L_1} \\ Z_{L_2} - Z_{L_1} \end{bmatrix}$$

$$\vec{a}_1 = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \end{bmatrix} = M_1^T \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{bmatrix}_1$$

$$\vec{a}_2 = \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ w_2 \end{bmatrix} = M_2^T \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{bmatrix}_2$$

$\vec{b}$, $\vec{a}_1$ and $\vec{a}_2$ are coplanar $\Rightarrow$ $\vec{b} \cdot (\vec{a}_1 \times \vec{a}_2) = 0$

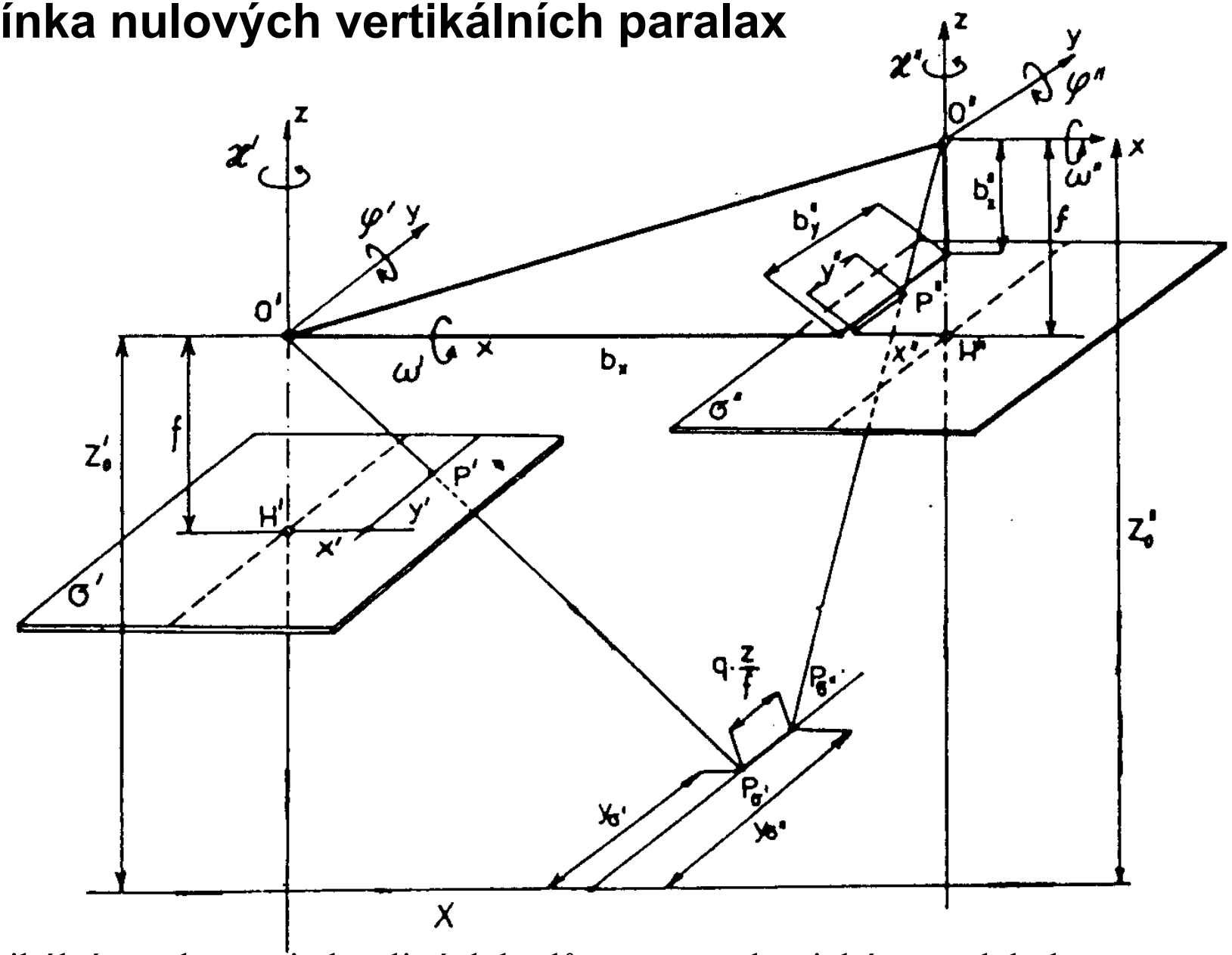
Therefore, the determinant of the vector components ends up zero

$\Rightarrow$

$$F = \begin{vmatrix} b_X & b_Y & b_Z \\ u_1 & v_1 & w_1 \\ u_2 & v_2 & w_2 \end{vmatrix} = 0$$

matematicky je to vyjádřeno součinem tří prostorových vektorů, který je roven 0

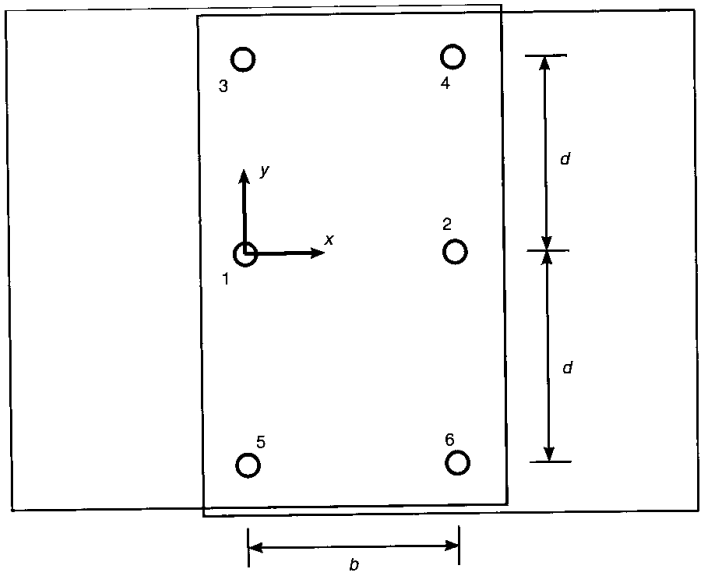
Podmínka nulových vertikálních paralax



vertikální paralaxy q jednotlivých bodů ve stereoskopickém modelu by měly být rovny nule

- prakticky se relativní orientace provádí 2 způsoby:
  - **nezávislá orientace**: snímky se pouze otáčejí a nemění polohu (mění se orientace obou snímků)
  - **připojení snímku**: nechává první snímek fixní (otáčí a posouvá pouze druhý snímek)

Relativní orientace



• Relativní orientace se řeší numericky s využitím kolineárních rovnic sestavených mezi snímkovými (*x'*, *y'*, *z'*) a modelovými souřadnicemi (*xm*, *ym*, *zm*).

• Lze využít jakýchkoliv dobře identifikovatelných bodů na snímcích, není třeba znát jejich geodetické souřadnice.

• Rovnice se však většinou řeší pro body **vhodně rozmístěné** na stereopáru – např. podle tzv. **Gruberova schématu**.

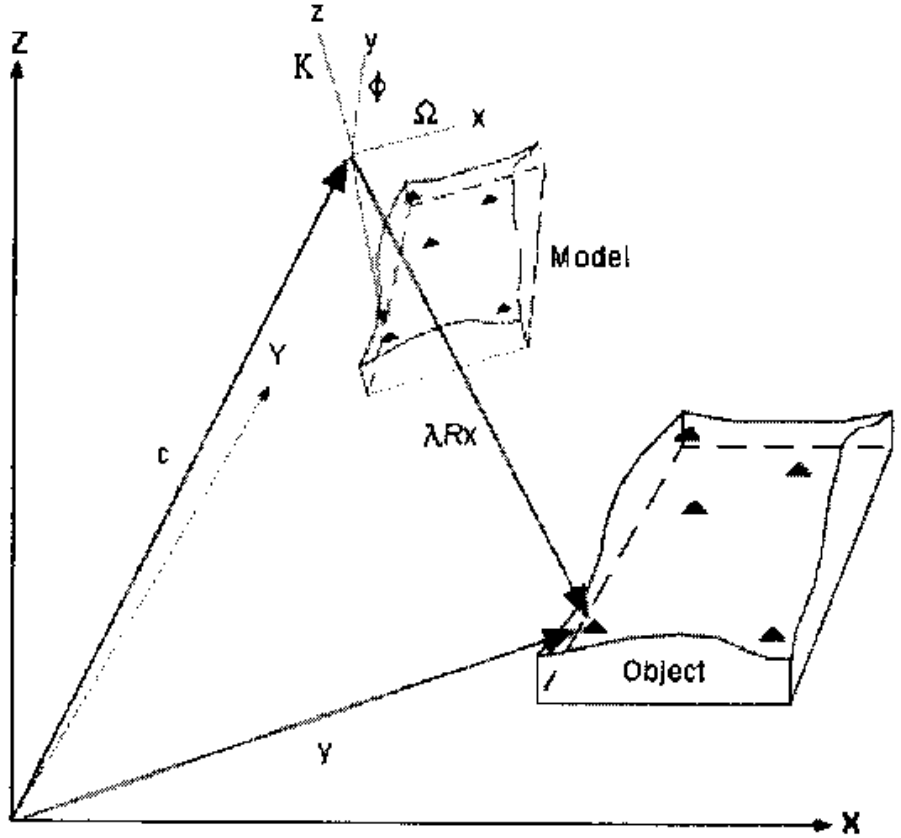
• Pokud se rozmístění bodů liší od ideálních poloh, přesnost určení prvků relativní orientace klesá.

Absolutní orientace -geodetická

Řeší vztah mezi modelovými a geodetickými souřadnicemi vlícovacích bodů

Posun, pootočení a náklon relativně orientovaného steromodelu do referenčního geodetického systému souřadnic:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_O \\ Y_O \\ Z_O \end{pmatrix} + kM \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}$$



Absolutní orientace -geodetická

Sedm parametrů (*Xo*, *Yo*, *Zo*, ω,φ, κ, *k*) **- prvky absolutní orientace –** potřeba min. sedm rovnic.

Určení sedmi neznámých prvků vnější orientace se provádí pomocí vlícovacích bodů MNČ.

Absolutní orientace vyžaduje minimálně dva úplné vlícovací body a jeden výškový bod, případně dva rovinné body a tři body výškové. Tyto body přitom nesmí ležet v jedné přímce.

V průběhu absolutní orientace stereopáru se určuje měřítko modelu (základna bx, X“-X‘), posun modelu ve směru os X, Y, Z, pootočení celého modelu a horizontace modelu.

Absolutní orientace zajišťuje změnu měřítka tak, aby obrazy vlícovacích bodů na snímku se ztotožnily s jejich obrazy na mapě.

Tvorba map fotogrammetrickými metodami

Stereoploter - stereoskopické kreslící zařízení

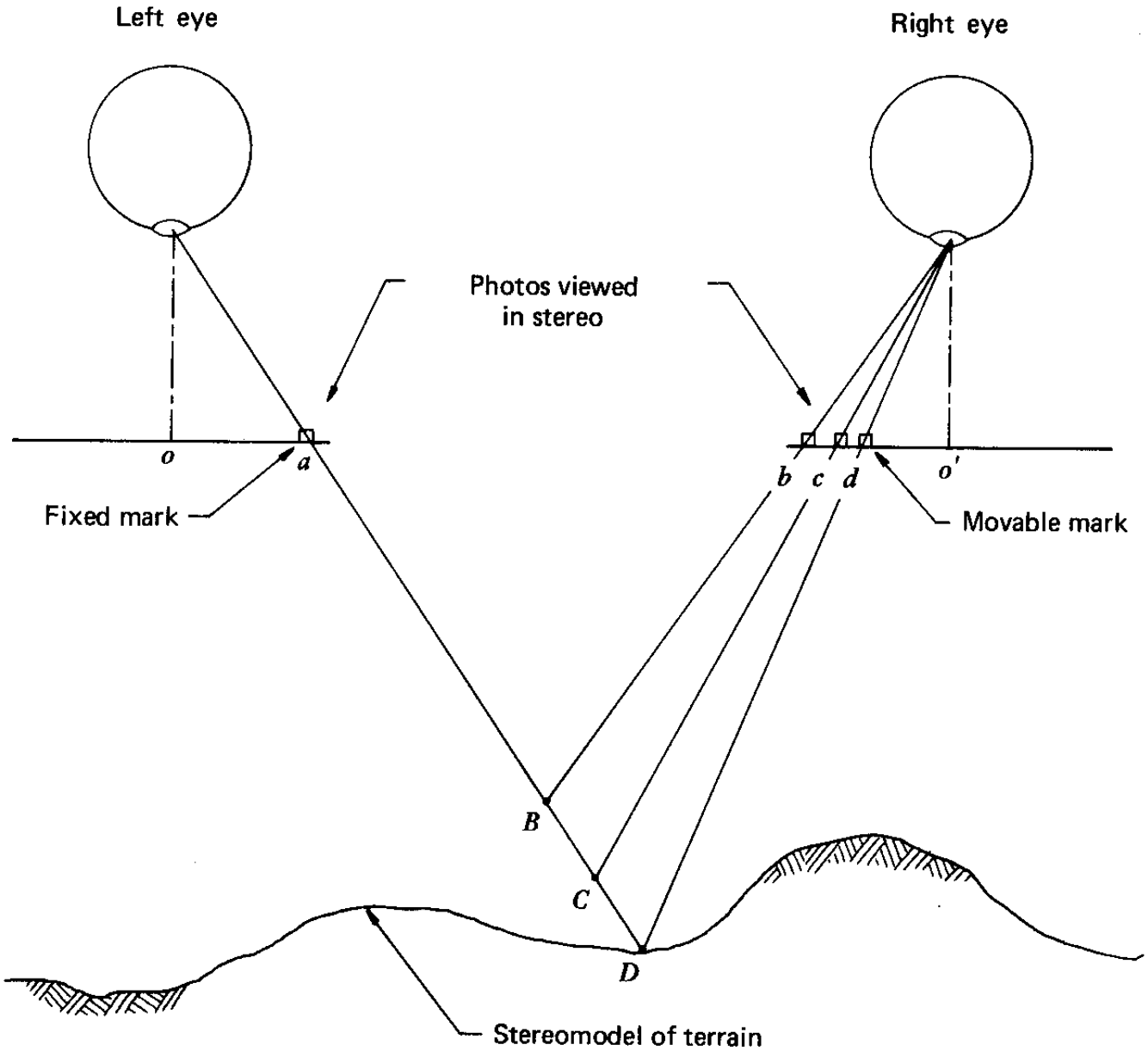
• Fotografie ve stereopáru je výsledkem projekce paprsků z terénu skrze optický systém na snímkovou rovinu.

• Ve stereoploteru je směr projekce opačný.

• Paprsky z fotografie jsou promítány ve stejné relativní orientaci, ve které byly vytvořeny tak, že vytvářejí zdánlivý trojrozměrný model z překrývajících se částí.

• Model lze nejenom prohlížet, ale lze na něm i měřit a převést ho do mapy.

Princip plovoucí měřické značky



Stereoskopické kreslící zařízení

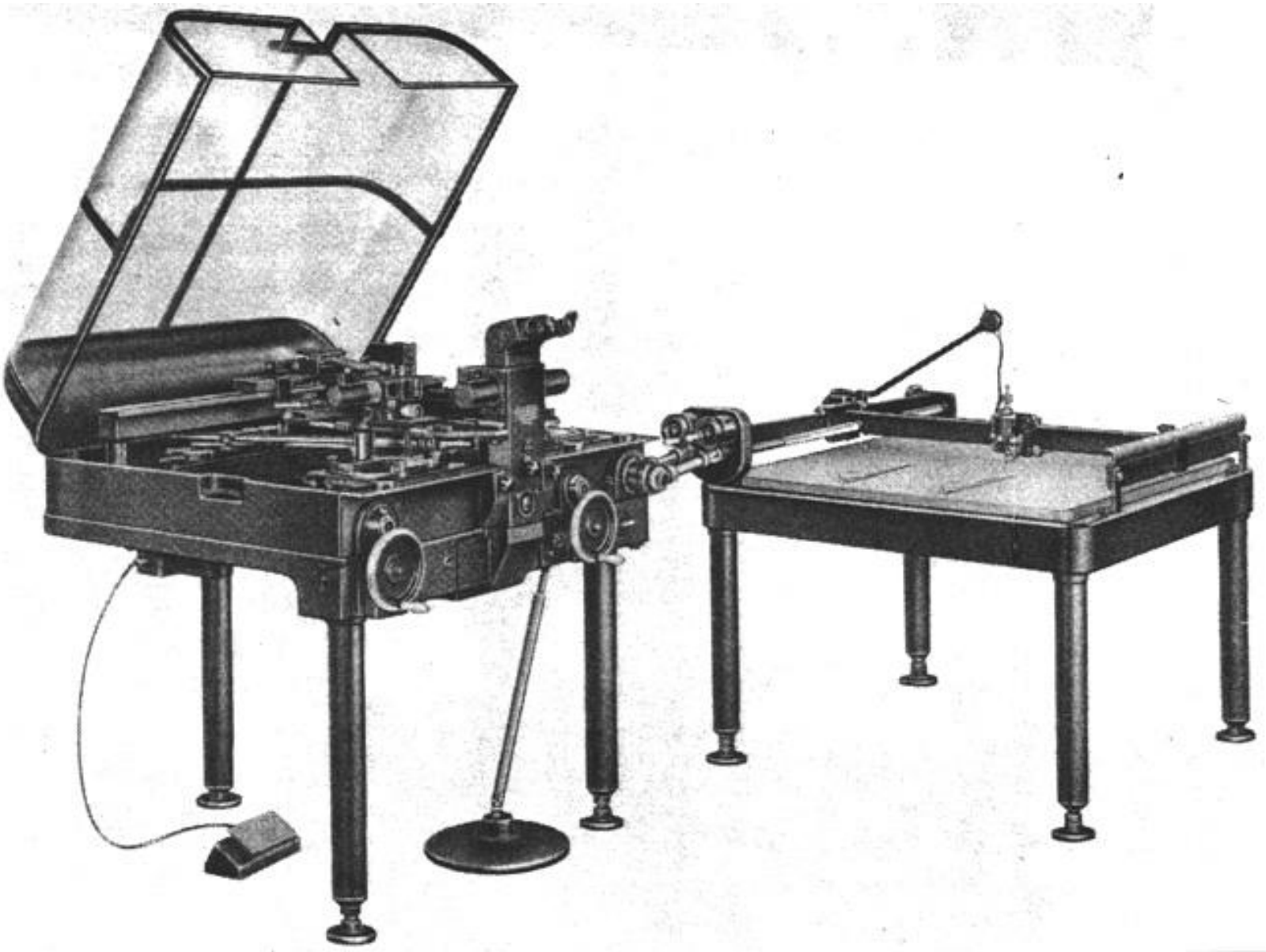
Stereoplotr - analogový, analytický, digitální

stejný princip práce

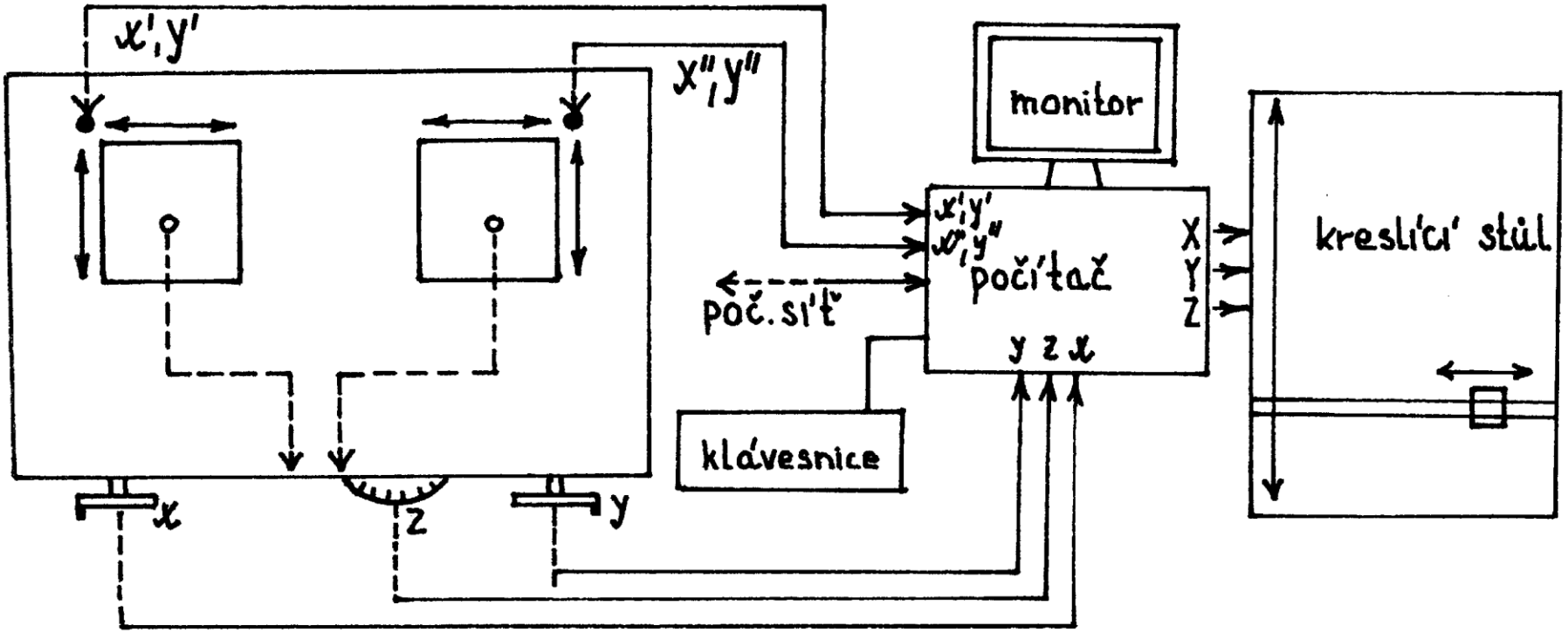
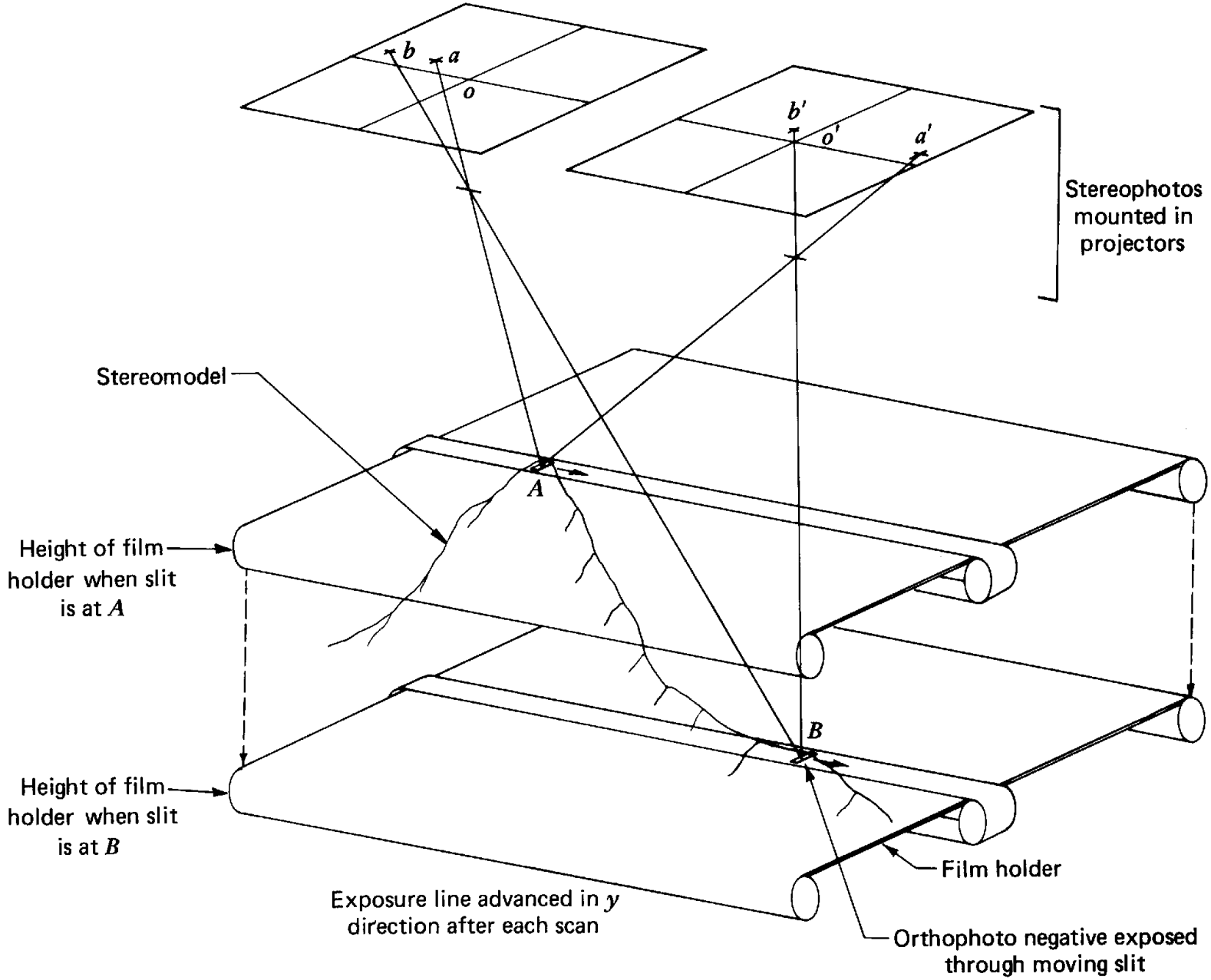
Základní součásti

1. projekční systém (vytváří stereo model)
2. zobrazovací systém (umožňuje stereoskopické pozorování)
3. měřící systém (měření výšek či překreslování objektů na mapu)

Analogový stereoplotr



Analytický stereoplotr



Diferenciální překreslování a princip tvorby ortofoto