



„Fotogrammetrie 1“

Prof. Dr. Ing. Karel Pavelka
E-mail: pavelka@fsv.cvut.cz

Úvod



Fotogrammetrie \Rightarrow část oboru geodézie a kartografie, který se zabývá zjišťováním geometrických a polohových informací z obrazových záznamů, nejčastěji z fotografických snímků

DPZ \Rightarrow zabývá se bezkontaktním zjišťováním druhů pokryvu povrchu a jejich stavem

Laserové skenování \Rightarrow technologie 3D skenování, která za pomoci laseru hromadně určuje prostorové souřadnice podrobných bodů na objektu

Úvod



Fotogrammetrie, DPZ a laserové skenování jsou metody, dodávající hromadně lokalizované informace pro technologii

GIS

Základní zdroje primárních informací o území dodávají:

- **geodetické metody** přesnost v řádu **mm - cm**
- **fotogrammetrie** přesnost v řádu **cm - dm**
- **DPZ** přesnost v řádu **m - km**

Historie



**Al-Hassan bin
Al –Haithm
(965-1039)**

**r.1032 jako
první popsal
„cameru
obscuru“ –
středově
promítání**

Historie



- Leonardo da Vinci (1452-1519) popsal „*dírkovou komoru*“ pro konstrukci středových průmětů
- 1605 Galileo Galilei vynalezl dalekohled
- 1657 Schott Kasper zkonstruoval první přenosnou komoru (*box camera*)
- r.1777 vynález světlocitlivé slouč. AgCl (C.H.Scheele)
- teorie rekonstrukce získaných perspektivních obrazů: Taylor (1715) a J.H.Lambert (1759)
- vynález fotografie: Niepce a Daquerre (1839)
- negativ-pozitiv: Talbot 1841
- název fotografie pochází od J.Herschela
- první snímky ze vzduchu pořídil známý francouzský fotograf G.F.Tournachon (zvaný Nadar) v roce 1858
- podle návrhu A.Laussedata (1859) byl konstruován první fototeodolit; využito ve Francii při mapování v r.1861
- "fotogrammetrie" je datována do roku 1858, kdy tento výraz použil Němec A.Meydenbauer
- G.Eastman, r.1884 (papírový film) a jeho zavedení do praxe r.1889 (celuloidový film, první fotoaparát na svitkový film)
- C.Pulfrich (Zeiss Jena) r.1901 zkonstruoval první přístroj pro stereoskopické měření *stereokomparátor*

Historie



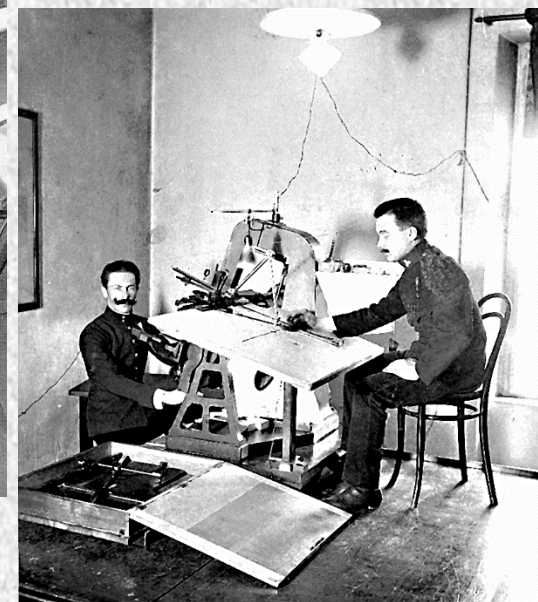
- E.Orel, 1909-1911 zkonstruoval první „Autostereograf“, od r.1909 v závodech Carl Zeiss Jena jako „Stereoautograf“
- Th.Scheimpflug zkonstruoval v r.1911 první překreslovač pro překreslení skloněného snímku rovinatého terénu do měřítka mapy
- W.Wright jako první snímkoval z letadla r.1903
- snímkování z letadel našlo uplatnění s příchodem I.světové války
- r.1935 přišel na trh první barevný film Kodakchrom
- během druhé světové války byly konstruovány některé nové komory a stroje a vypracovány metody využití fotogrammetrie, ale především pro vojenské účely
- další rozvoj fotogrammetrie nastal opět až po r. 1945 (analogové stroje)
- kosmické technologie
- sedmdesátá léta – analytické stroje
- osmdesátá léta – rozvoj digitálních technologií
- devadesátá léta – plný přechod na digitální technologii

Historie

Karel Kořistka (1825-1906) profesor matematiky a geodézie, první rektor Královského českého polytechnického ústavu v Praze ve školním roce 1864-65. Průkopník fotogrammetrie v českých zemích

K. Kořistka se s ní seznámil s fotogrammetrií na studijní cestě v r. 1862 přímo u A. Laussedata a po návratu z této cesty ji použil v Praze

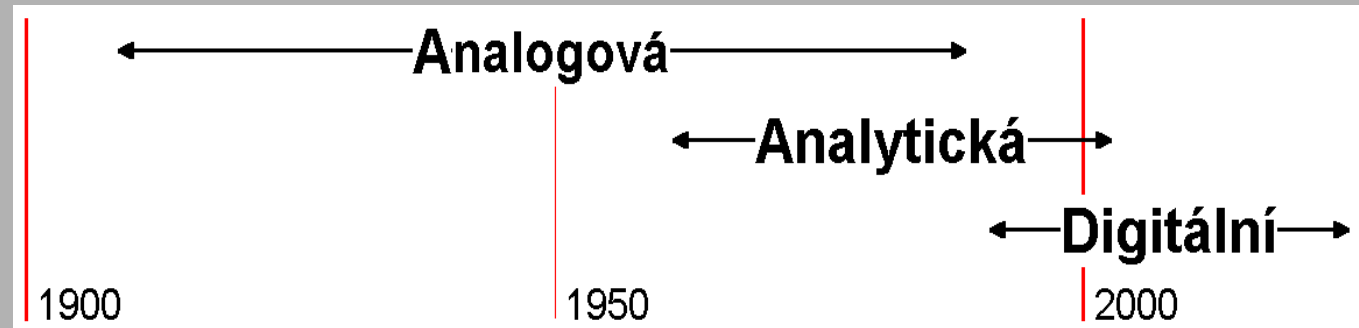
I. světová válka



Fotogrammetrie - rozdělení



- Základní etapy vývoje: technologie



Základní kritéria dělení fotogrammetrie

a) podle polohy stanoviška

pozemní, letecká, družicová

b) podle počtu a konfigurace snímků

jednosnímková a vícesnímková: stereo či průseková

b) podle technologického postupu zpracování

analogová, analytická, digitální

Využití fotogrammetrie



Státní mapová díla (resort ČÚZK) topografické mapy (1:10 000)

Vojenské topografické mapy (Armáda ČR)

Informační systémy (státní správa, informační vrstvy GIS), digitální modely (**DMR a DMP**)

Památková péče (pracovníci památk.péče, architekti) dokumentace, podklady

Stavebnictví (projekční a stavební firmy) podklady, dokumentace, určení deformací

Životní prostředí (správy NP a CHKO, ÚHÚL) lesnické mapy, delimitace vegetace

Dále:

- **územní plánování** - 3D modely zástavby
- **vodní hospodářství** – povodně, odtokové profily
- **inventarizace a monitoring** - doly, lomy, skládky
- **strojírenství** - kontrola přesnosti, deformace
- **rehabilitační lékařství, biomechanické aplikace**

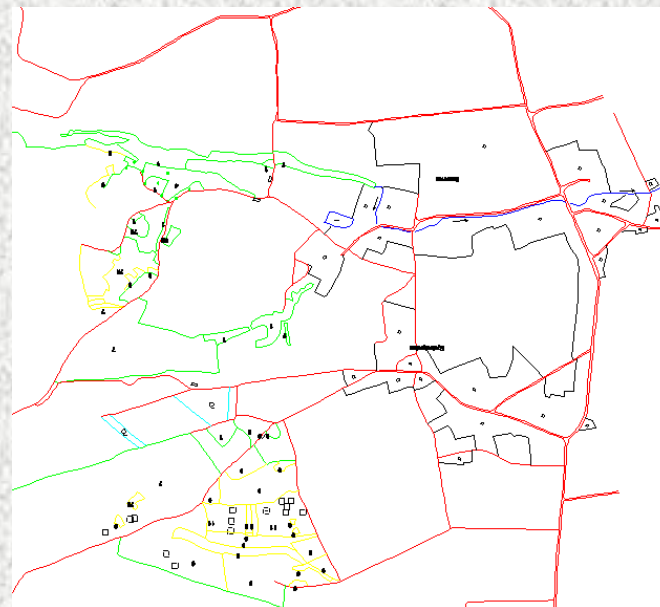
Využití fotogrammetrie v mapování



snímek



⇒ mapa

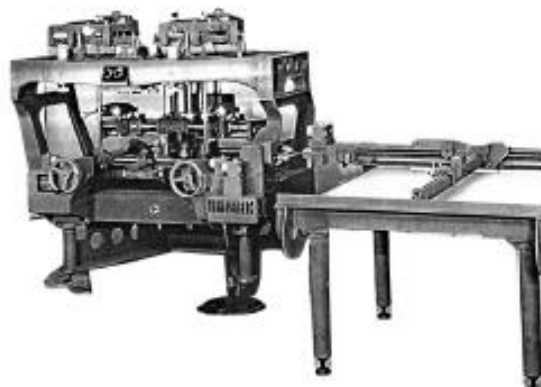
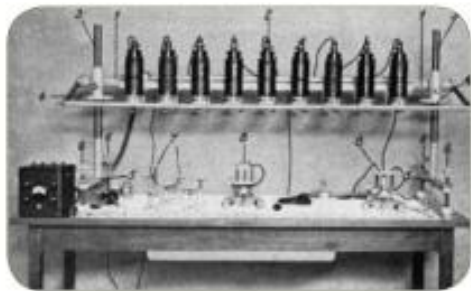




Důvody nasazení fotogrammetrie

- ⇒ **minimalizace práce v terénu**
 - ⇒ **ekonomika**
 - ⇒ **rychlost**
- **celková úspora času**
- **úspora nákladů**
- **dokumentační hodnota snímků (časová řada)**
- **vyšší vypovídací schopnost snímků ve srovnání s mapou (digitální ortofoto)**

Od analogové fotogrammetrie po digitální



DPW (digital photogrammetric Workstation (1990- dnešek)

pracovní

fotogrammetrická

stereo stanice



Digitální (automatická) fotogrammetrie (po r. 2010)

Princip obrazové korelace

Agisoft Photoscan-Metashape,

Zephyr 3D, pix4D, 123catch, aj.)

SfM+ MVS (structure from motion
and multi view stereo)

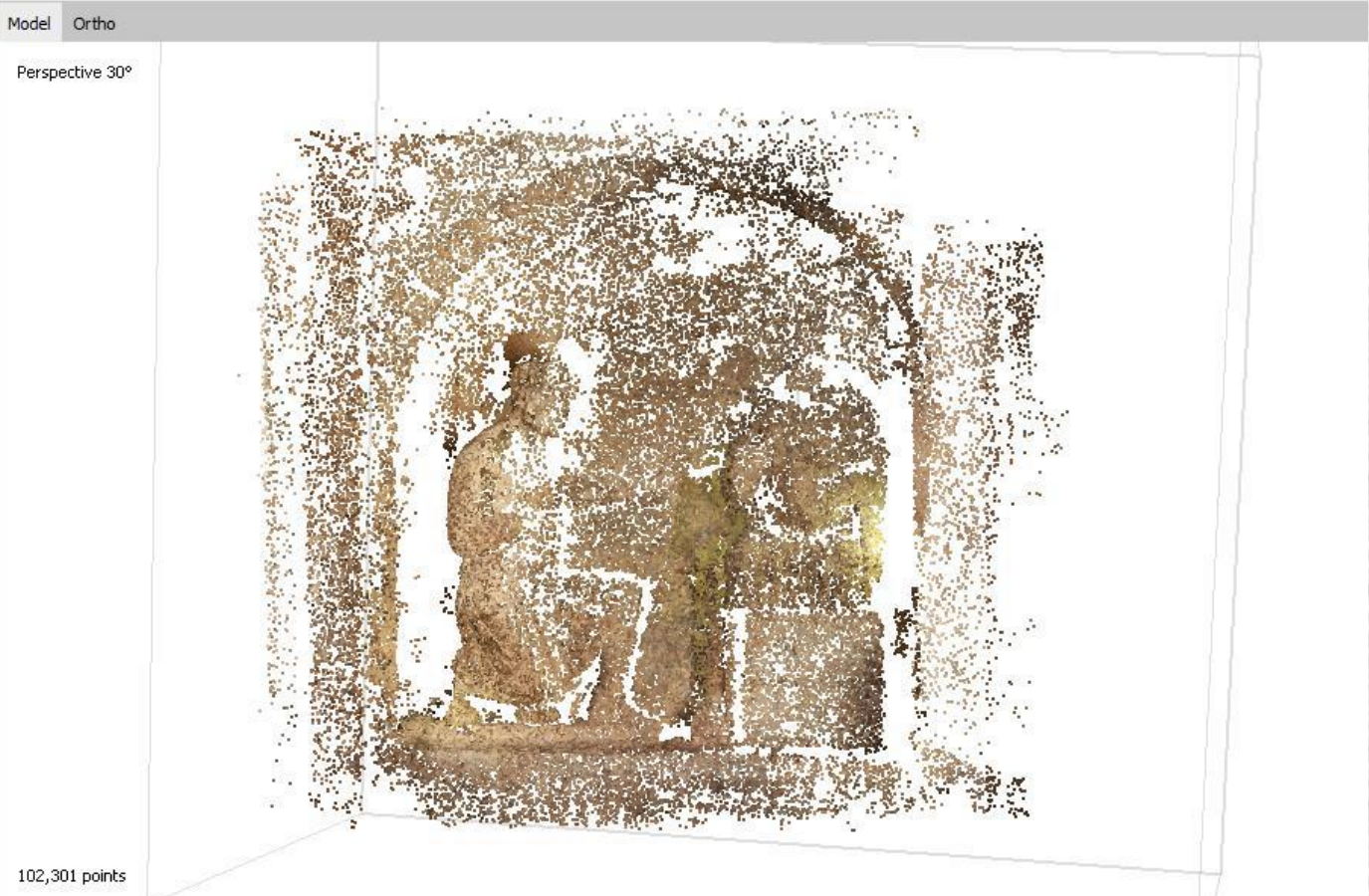




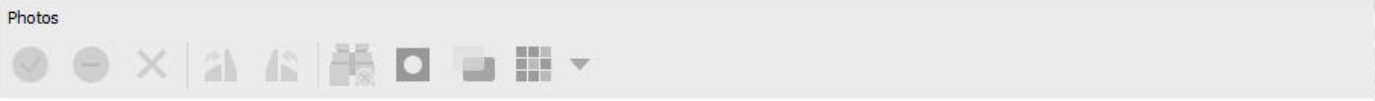
Workspace

Workspace (1 chunks, 138 cameras)

▶ **Chunk 1 (138 cameras, 102,301 points) [T]**



102,301 points



IMG_3975 IMG_3976 IMG_3977 IMG_3978 IMG_4782 IMG_4783 IMG_4784 IMG_4785



workspace

Model Ortho

Perspective 30°

Workspace (1 chunks, 138 cameras)

Chunk 1 (138 cameras, 102,301 points) [T]



points: 57,778,176

Photos



IMG_3975

IMG_3976

IMG_3977

IMG_3978

IMG_4782

IMG_4783

IMG_4784

IMG_4785

Model Ortho

Perspective 30°



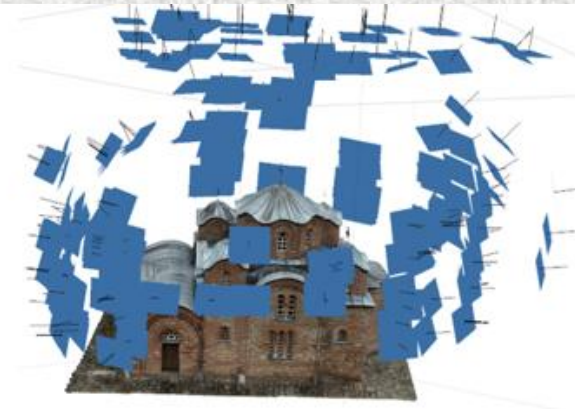
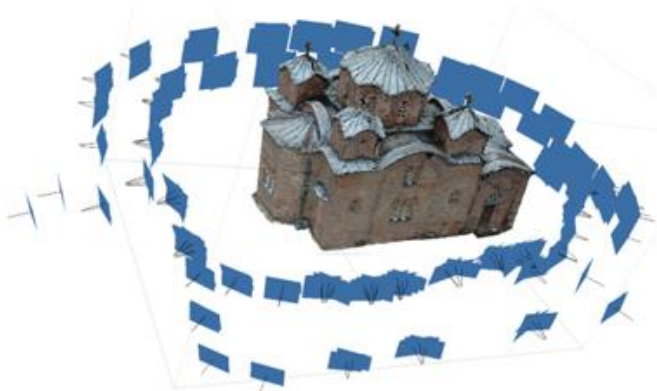
faces: 1,283,957 vertices: 1,232,169

Mračno bodů (point cloud) vs. texturovaná síť (mesh)



Heřmánkovice, Vižňov; broumovská skupina kostelů

Sv. Panteleimon, Skopje







2003, GSD 50 cm



2015, GSD 15cm



L-410FG



2021 GSD 2cm

Základy fotogrammetrie

Základy fotogrammetrie

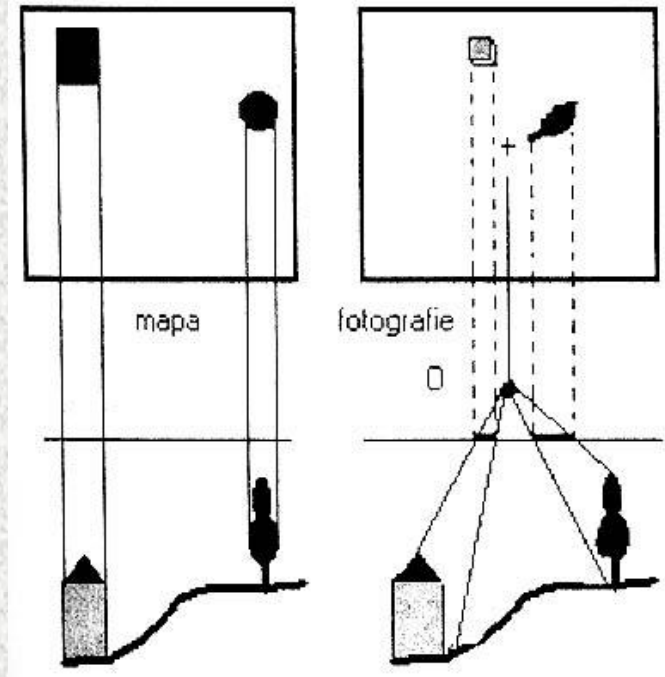
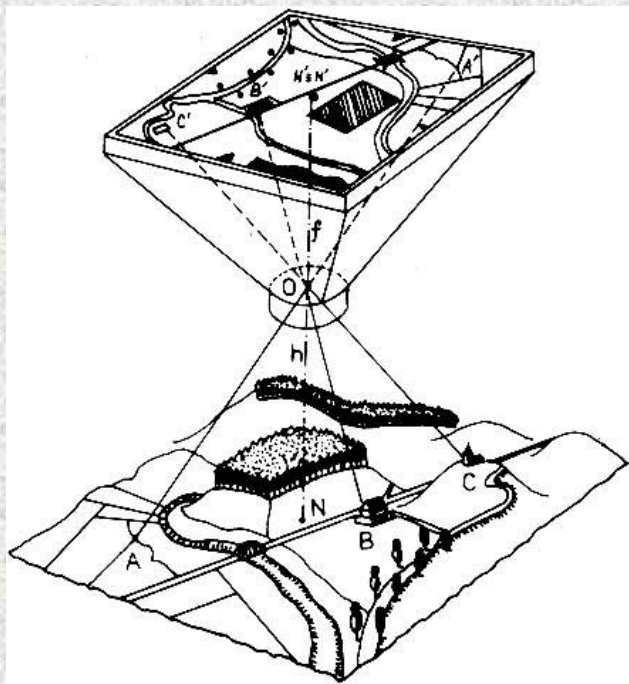


fotografický snímek = středový průmět zobrazeného předmětu

Vstupní data:

⇒ **snímek** - zdroj informací

⇒ **nutná doplňková data** - geodetické souřadnice
vlíčovacích bodů, prvky vnitřní (vnější) orientace





Vznik obrazu

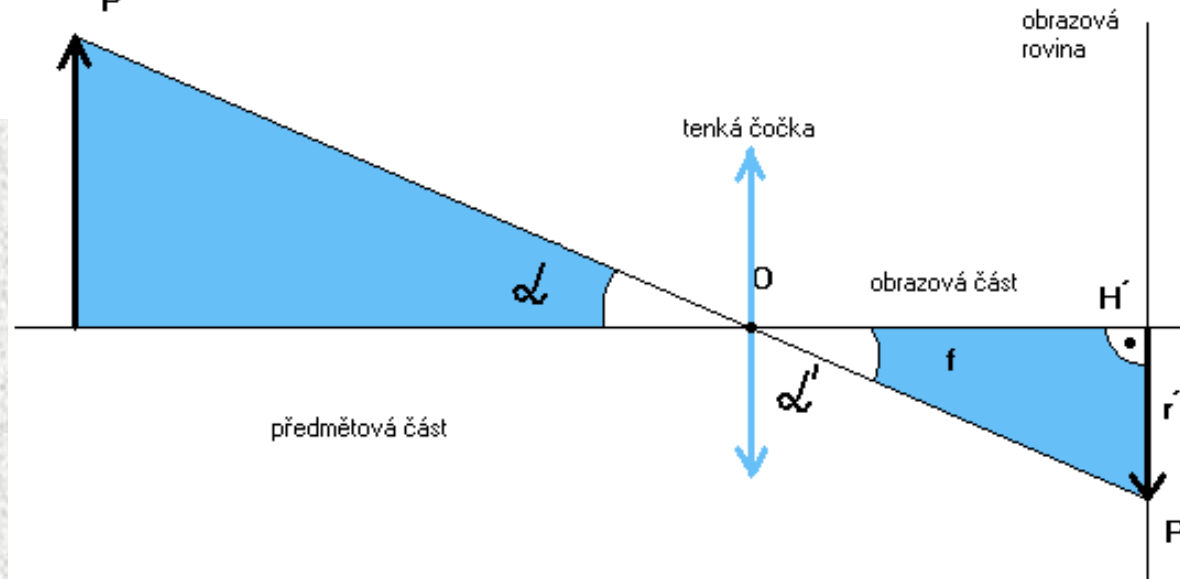
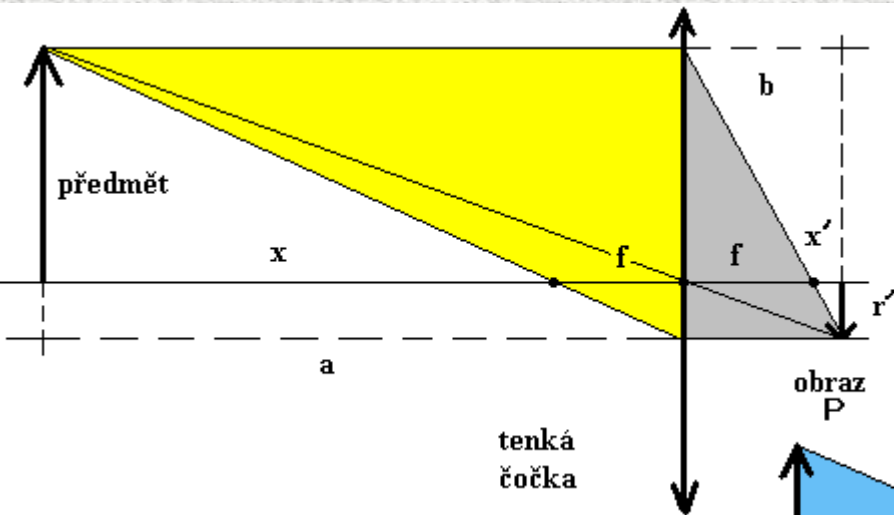
Zobrazení ideální čočkou

střed promítání	O
hlavní snímkový bod	H'
Ohnisková vzdálenost	f

Pro ideální zobrazení platí:

$$\alpha = \alpha' \quad r' = f \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$



Vznik obrazu



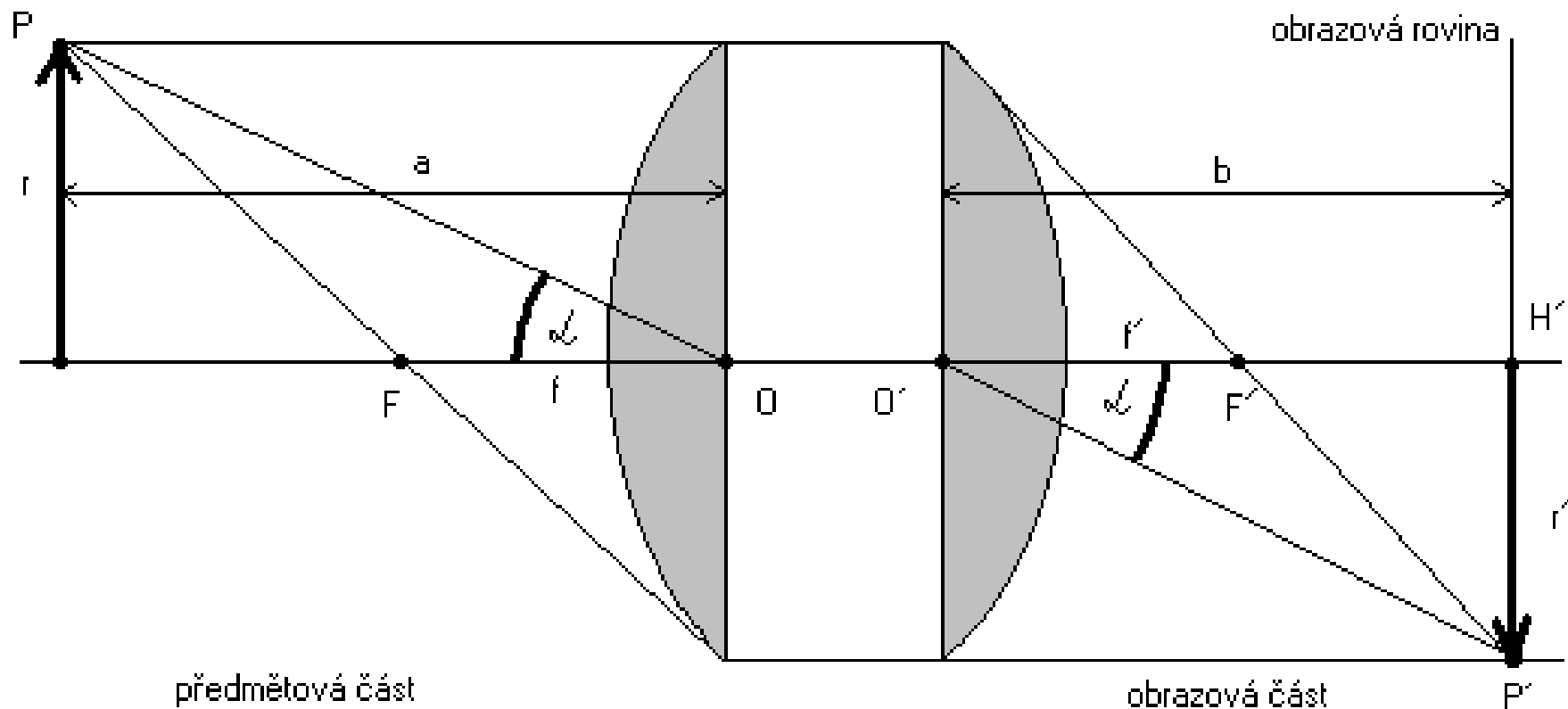
Skutečný objektiv

clona - redukuje množství paprsků vytvářejících obraz

O vstupní pupila - obraz clony v prostoru předmětovém

O' výstupní pupila - obraz clony v prostoru obrazovém

f konstanta komory - vzdálenost O'H'



Vznik obrazu

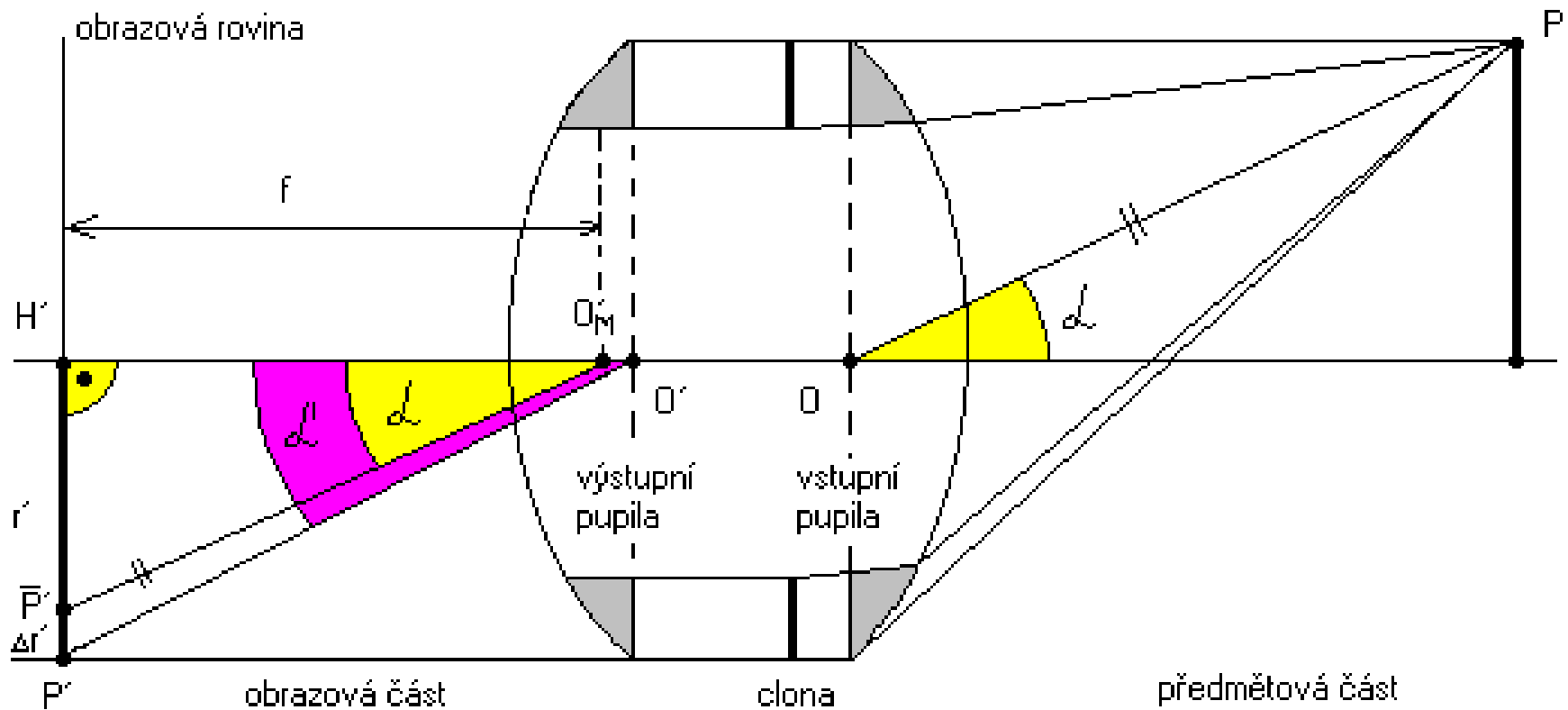
Zobrazení skutečným objektivem



$$\alpha \neq \alpha'$$

$$r' = f \cdot \tan \alpha + \Delta r'$$

$\Delta r'$ - vliv distorze



Hloubka ostrosti



$$y_{\min} = \frac{f^2}{\left(\frac{f}{A}\right) \cdot \Delta u} = \frac{f^2}{n \cdot \Delta u}$$

kde n je clonové číslo a Δu je rozptylový kroužek (neostrost), který by neměl být větší, než průměr měřické značky (0.02-0.05mm); A je průměr vstupní pupily.

typ komory	f [mm]	n	y_{\min} ($\Delta u=0.05$ a 0.02 mm) [m]
PhoTheo19/1318	195	25	30; 76
UMK 10/1318	100	8, 16, 32	25, 13, 6; 63, 32, 16

Parametry starých fototeodolitů

Souhrn vlivů působících na geometrii zobrazení objektivem



- Aberace

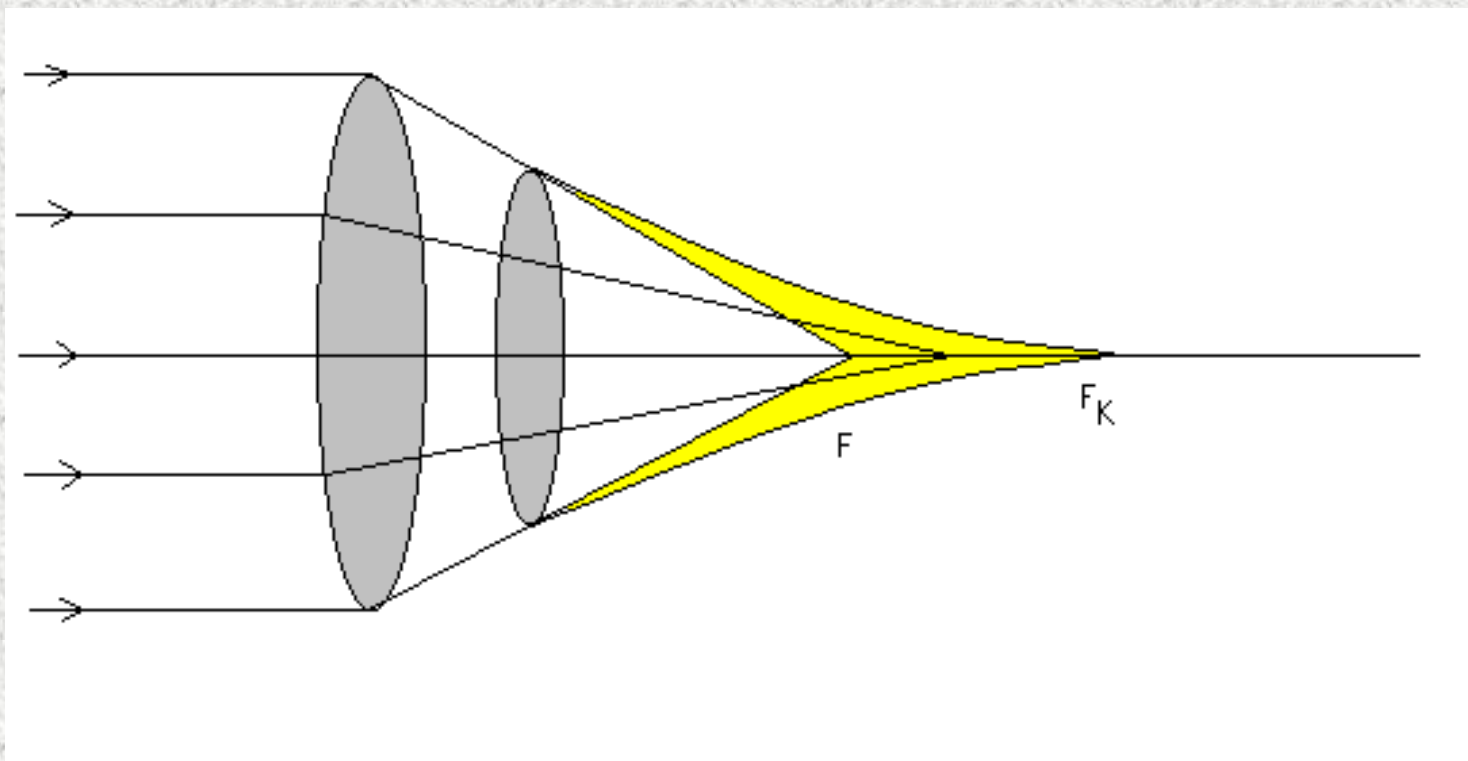
Optické vady můžeme rozdělit na:

- a) jednobarevné (monochromatické)
- b) barevné

Dále na vady vznikající při:

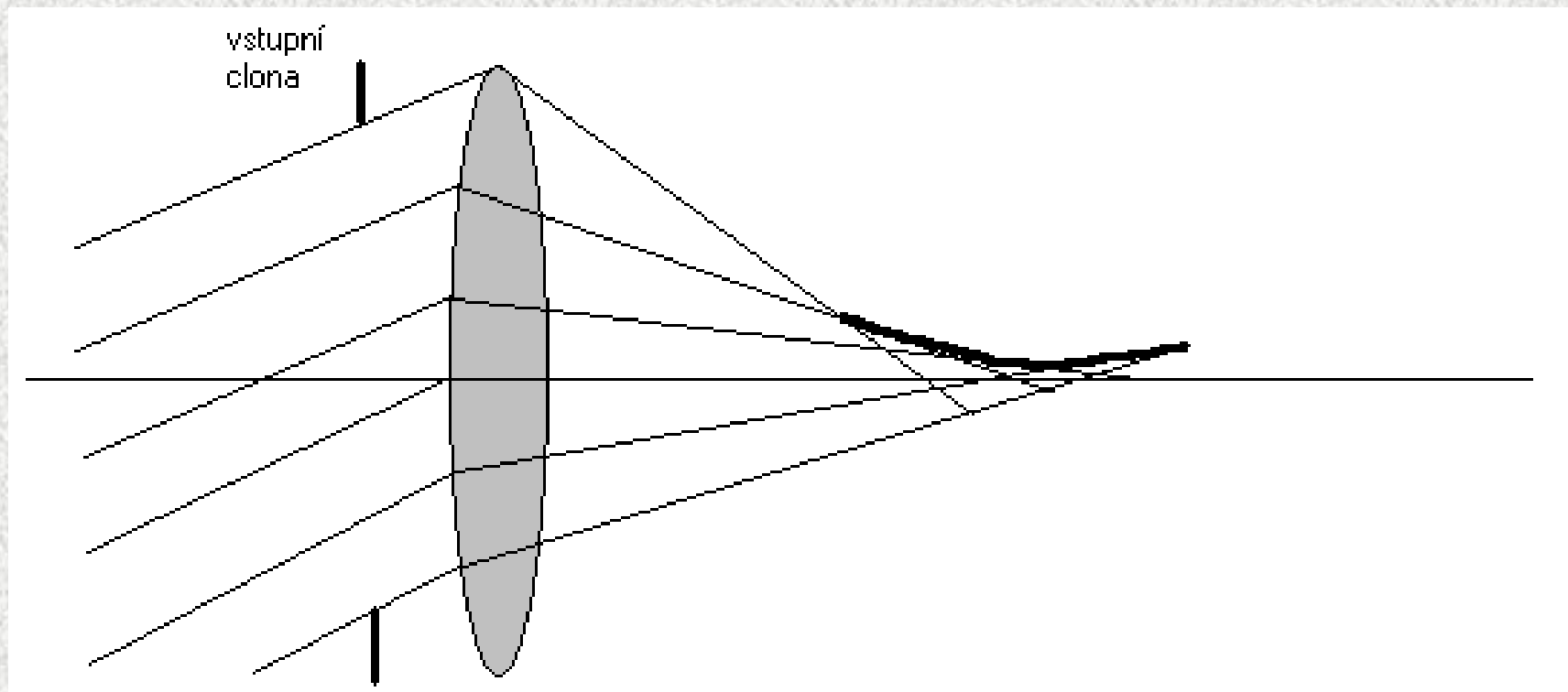
- c) zobrazování bodu (sférická vada, astigmatismus a koma)
- d) zobrazování předmětu (zklenutí pole a zkreslení obrazu)

Vady objektivů



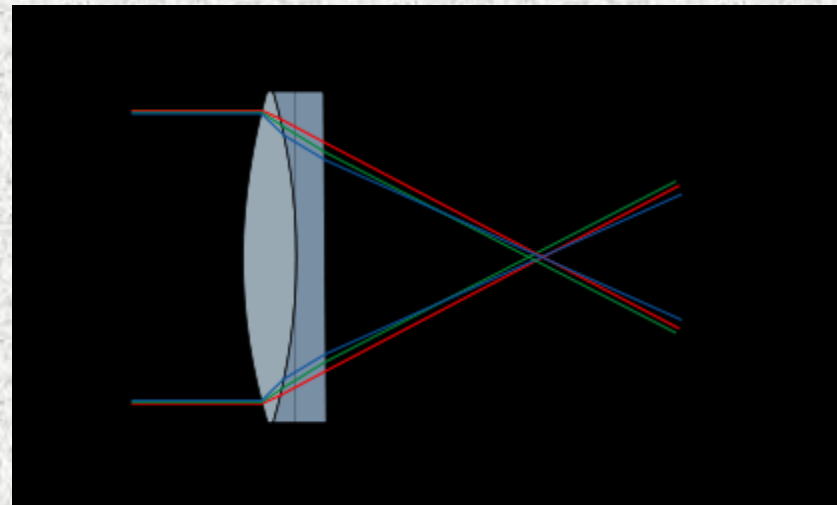
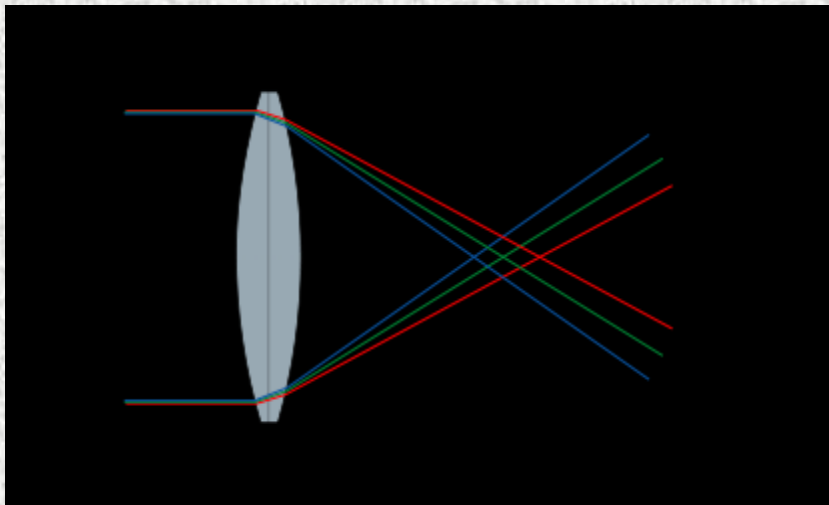
Zobrazení objektivem - sférická vada

Vady objektivů



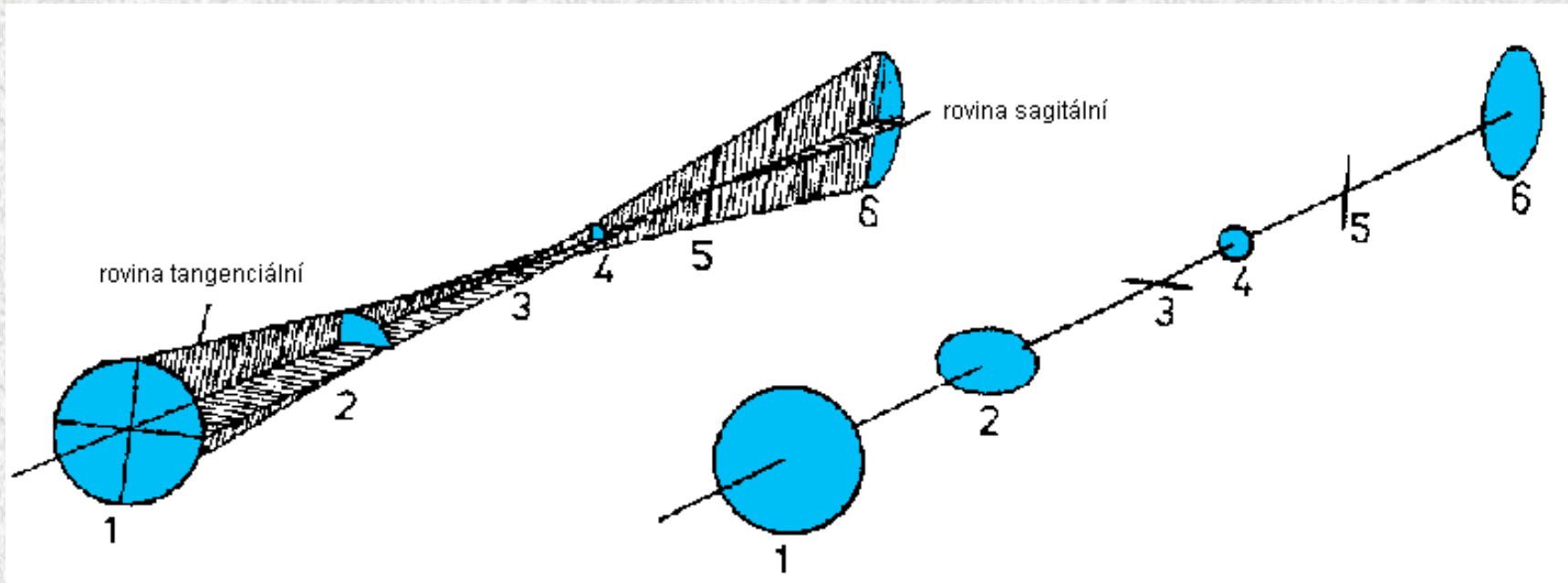
Zobrazení objektivem - asférická vada

Vady objektivů



*Zobrazení objektivem – chromatická (barevná) vada
a její potlačení*

Vady objektivů



Zobrazení objektivem - astigmatismus

Distorze objektivu



- - radiální
- - tangenciální

$$x' = x'_{\text{measured}} + \Delta x'$$

$$y' = y'_{\text{measured}} + \Delta y'$$

Obecně lze tedy vyjádřit vliv radiální distorze pomocí polynomu $\Delta x' = a_0 + a_1 x' + a_2 y' + \dots$

$$\Delta y' = b_0 + \dots$$

$$r'^2 = x'^2 + y'^2$$

$$\Delta x' = x' \cdot (a_1 r'^2 + a_2 r'^4 + a_3 r'^6) + b_1 (r'^2 + 2x'^2) + 2b_1 x' y'$$

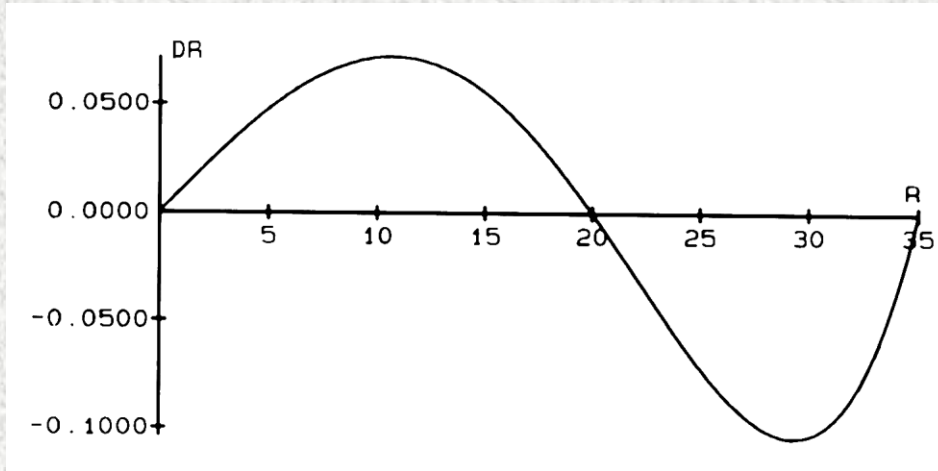
$$\Delta y' = y' \cdot (a_1 r'^2 + a_2 r'^4 + a_3 r'^6) + b_2 (r'^2 + 2y'^2) + 2b_2 x' y'$$

Tento tvar je příliš podrobný, pro většinu objektivů lze vystačit pouze s koeficienty a_1, a_2 .

Réseau systém RolleiMetric

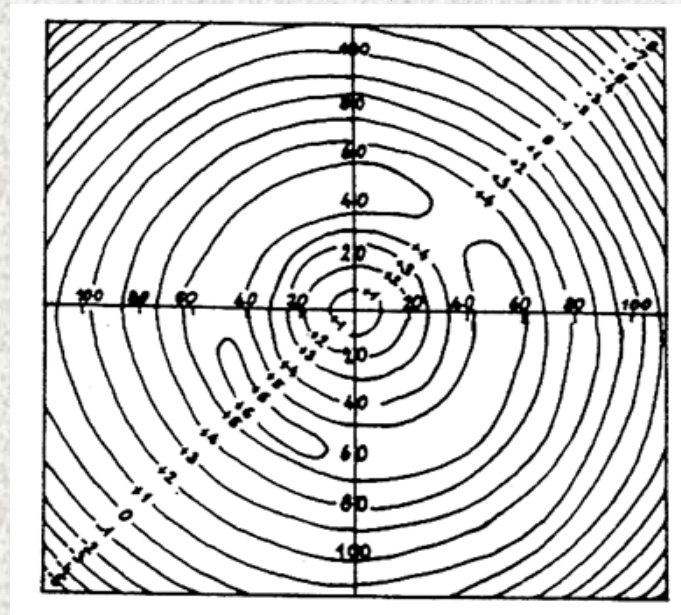
$$\Delta r' = a_1 \cdot r' \cdot (r'^2 - r_0'^2) + a_2 \cdot r' \cdot (r'^4 - r_0'^4)$$

Distorze objektivu



Zobrazení objektivem - průběh radiální distorze (RolleiMetric 6006, objektiv 40mm)

Zobrazení objektivem - radiální distorze vyjádřená pomocí izolínií



Srážka fotografického materiálu



Srážku fotografického materiálu dělíme na:

- pravidelnou v celé ploše snímku - tuto srážku lze velmi snadno zjistit porovnáním známých délek
- diferenční - jde o pravidelnou srážku, která je odlišná ve směru osy x' a osy y'
- nepravidelnou - tato srážka se bez speciálního zařízení (*réseau* - mřížka) prakticky nedá vyloučit.

Materiál	průměrná srážka s = rozměr snímku[mm]	hodnoty pro snímek 13x18cm
skleněná deska	max. 3-5 μ m	3-5 μ m
acetátová podložka	$4 \cdot 10^{-5} \cdot s$	7 μ m
PET podložka	$2.5 \cdot 10^{-5} \cdot s$	4.5 μ m

*Srážka
fotografického
materiálu*

Průhyb fotografického materiálu



Podložka	pozn.	Tloušťka [mm]	Rovinnost [μm]
skleněné desky	ploché	1.3-3.0	30-50
	ultraploché	1.3-3.0	25
	broušené sklo	6.0	5-10
film PET (polyester tereftalát)	mechanické tlakové nebo vakuové přisávání materiálu	0.06÷0.003 až 0.18÷0.005	5-20 dle typu přilnutí materiálu k rámu

Parametry fotografického materiálu



Souřadnicové soustavy

Obecně se v naší fotogrametrii užívá dvou typů systémů souřadnic:

a) **hlavní souřadnicové systémy**

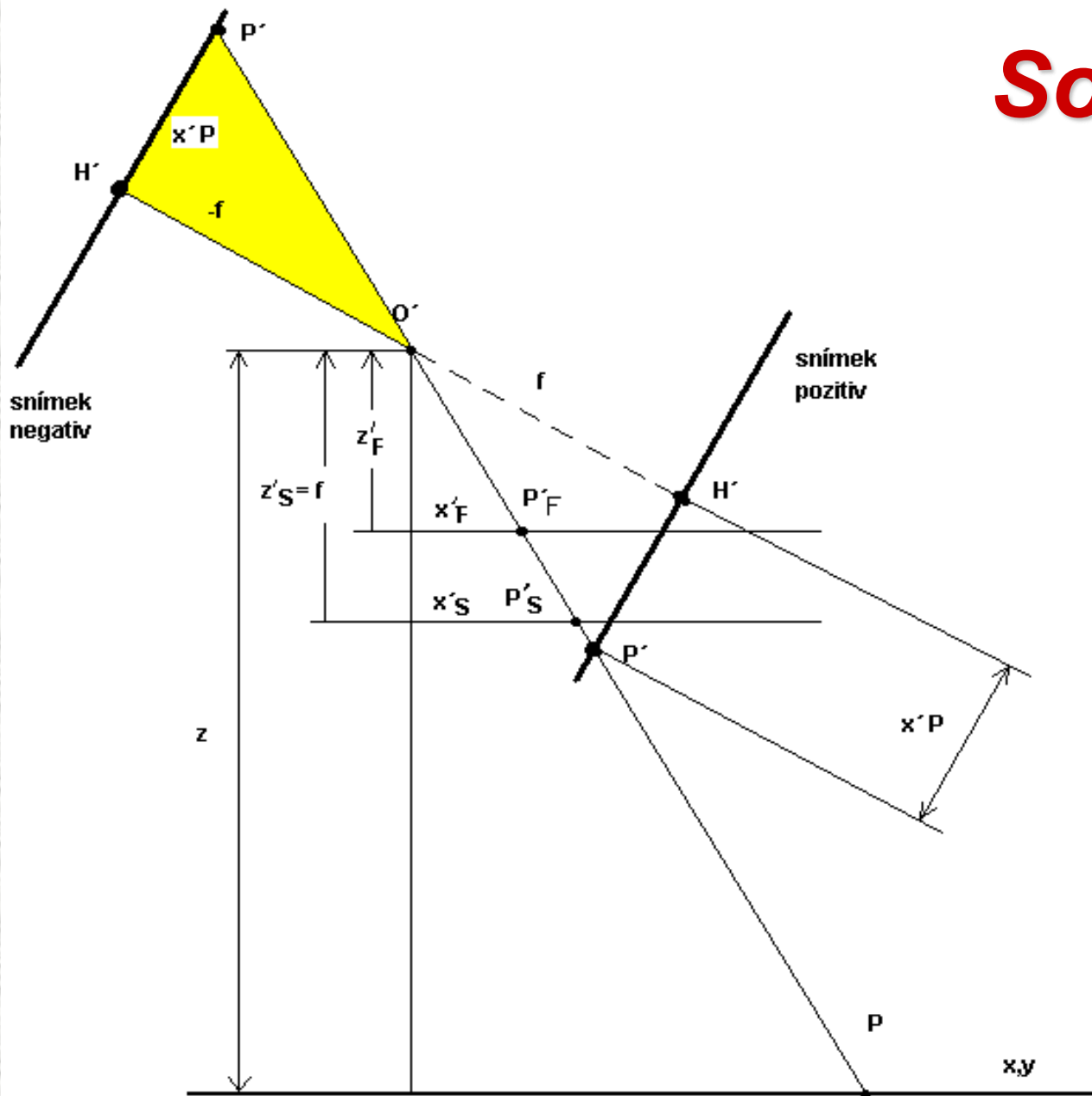
- b) - systém snímkových souřadnic
- systém modelových souřadnic
- systém geodetických souřadnic

b) **pomocné souřadnicové systémy**

- systém fiktivních snímkových souřadnic
- systém snímkových souřadnic přesně svislého snímku

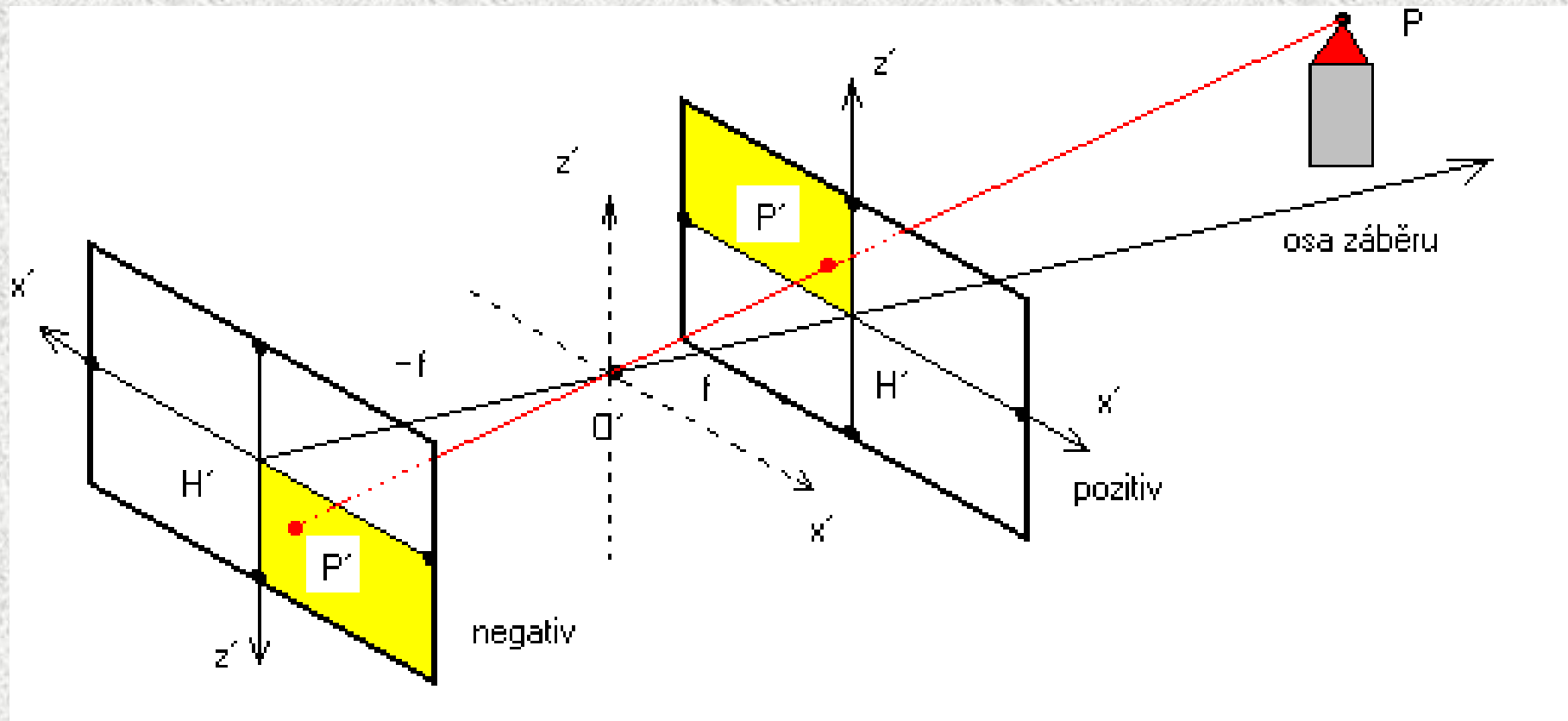


Souřadnicové soustavy



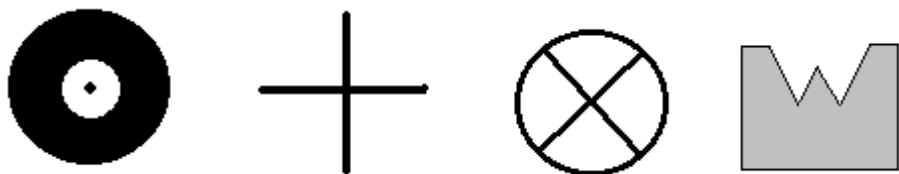


Prvky vnitřní orientace

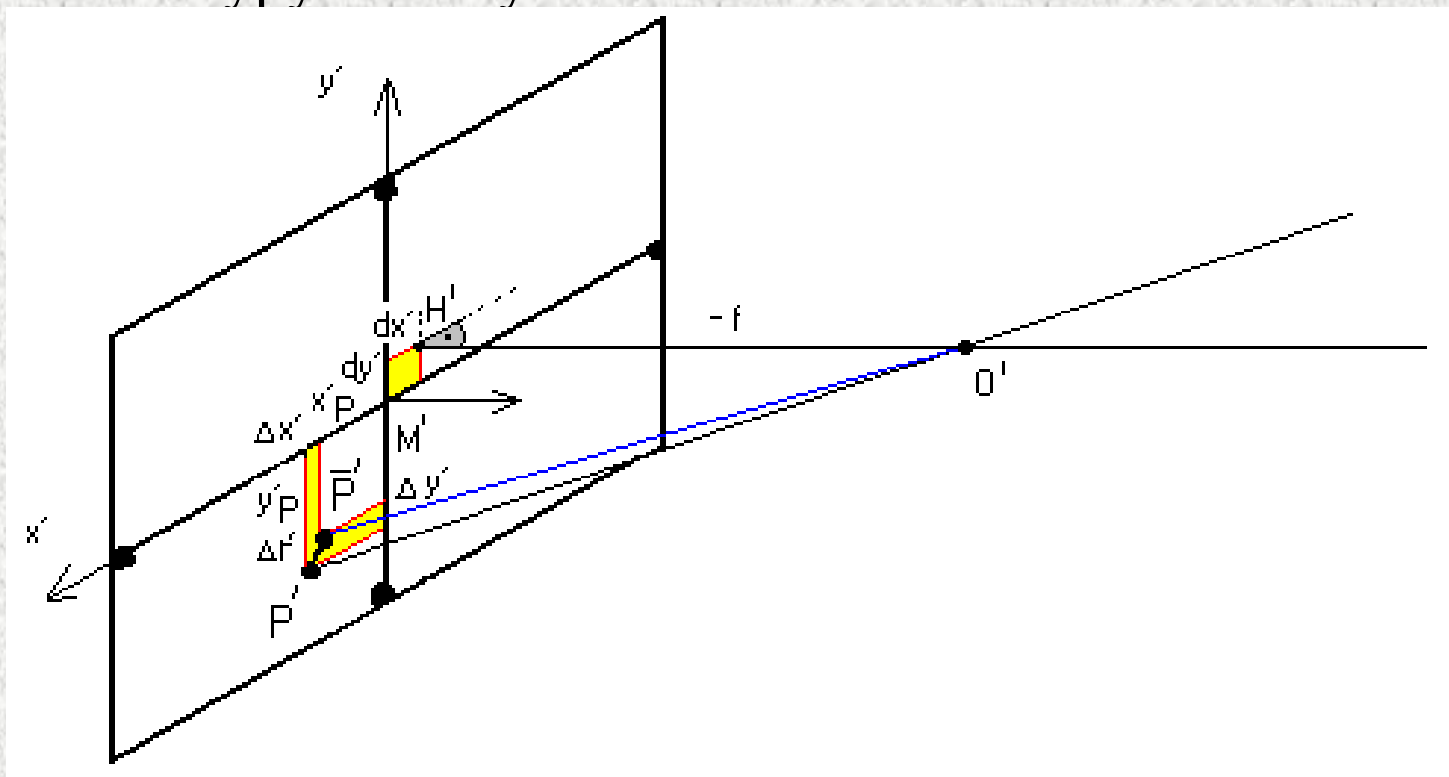


Konstanta komory, negativ a pozitiv, pozemní konfigurace

Prvky vnitřní orientace



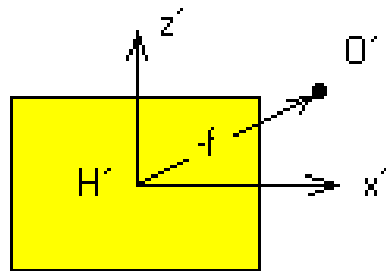
Různé typy rámových značek



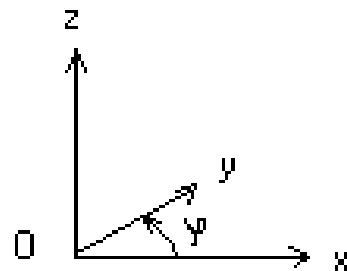
Definice prvků vnitřní orientace v obecné konfiguraci (snímkové souřadnice x', y'); Osa záběru je kolmice k obrazové rovině procházející předmětovým projekčním centrem.

Souřadnicové soustavy a převody

Prvky vnitřní a vnější orientace



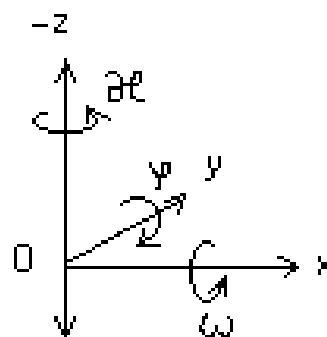
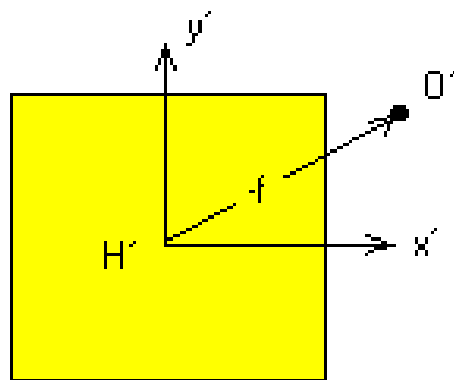
snímkové souřadnice



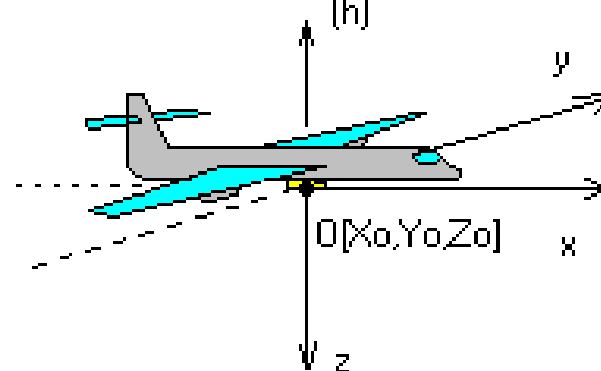
modelové souřadnice



pozemní fotogrammetrie



letecká fotogrammetrie
(h)



Prvky vnitřní a vnější orientace pro pozemní a leteckou fotogrammetrii

Souřadnicové soustavy



Soustava snímkových souřadnic:

označení: x' , y' , ($z' = -f$)

Soustava modelových souřadnic :

označení: x , y , z

Soustava geodetická:

označení: X , Y , Z

Pomocné soustavy:

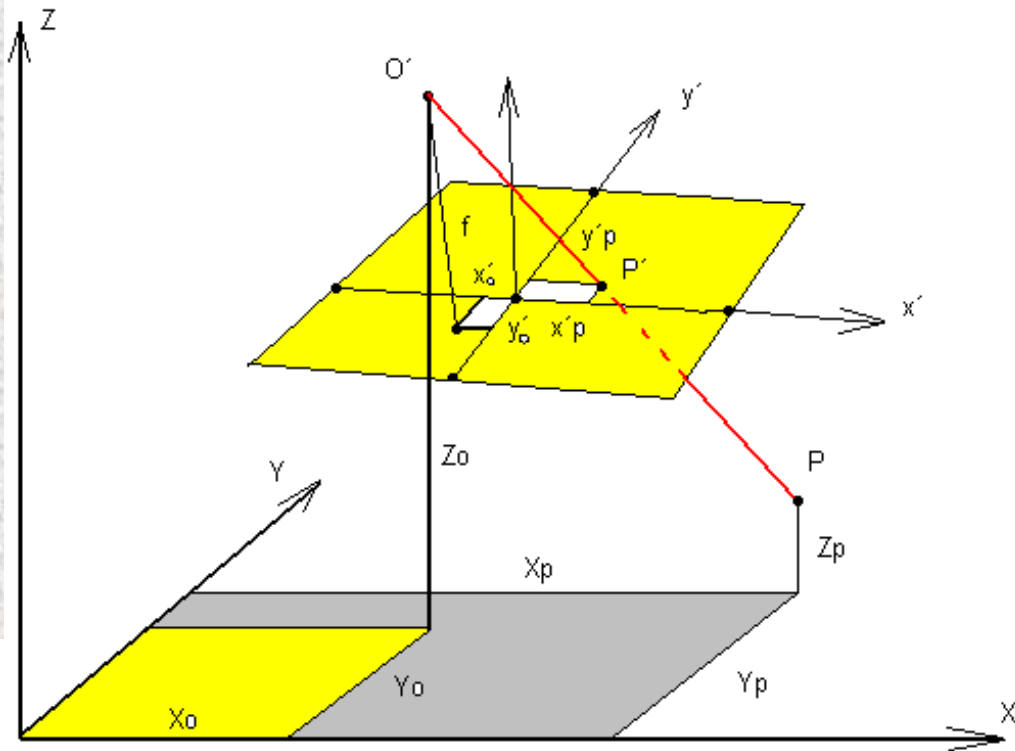
Soustava fiktivního snímku:

x'_F, y'_F, z'_F

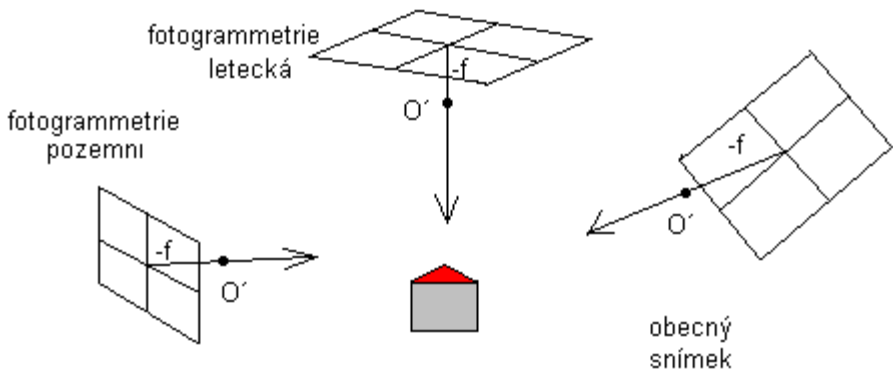
Soustava svislého snímku:

x'_S, y'_S, z'_S

Klasický pozemní, letecký
a obecný snímek



Souřadnicové soustavy
v letecké fotogrametrii



Převod informací ze snímku do geodetických systémů



1) Obnovení prvků vnitřní orientace

2) Vnější orientace

Vnější orientace lze řešit klasicky ve dvou krocích jako:

1. **-relativní orientaci** (vzájemná orientace mezi oběma stereosnímky, utvoření libovolně prostorově orientovaného stereomodelu)
2. **-absolutní orientaci** (pootočení a posun modelu do referenčního geodetického systému)
3. - v jednom kroku **metodou svazkového vyrovnání** (*Bundle Adjustment*, *Bündelausgleichung*)

Matice rotace



Při vzájemném převodu souřadnicových soustav se jedná obecně o *pootočení*, *posun* a *změnu měřítka*. Zatímco posun a změna měřítka jsou poměrně jednoduché operace, prostorové pootočení je složitější

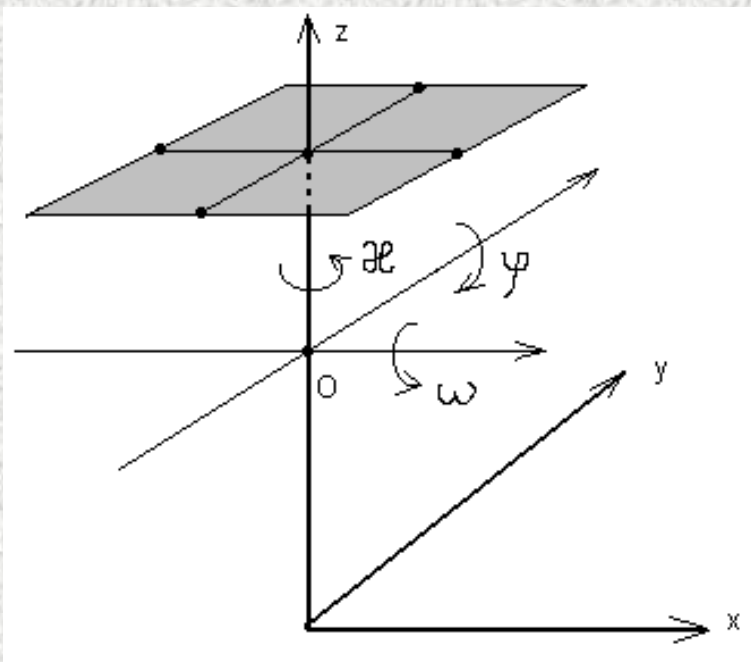
Rotace v rovině

$$X = x \cdot \cos \alpha - y \cdot \sin \alpha$$

$$Y = x \cdot \sin \alpha + y \cdot \cos \alpha$$

$$\mathbf{X} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{x},$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{pmatrix}$$



Rotace v prostoru

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$$

ω, φ, κ (primární, sekundární a terciální rotace)

Matice rotace



Rotace kolem primární osy x'

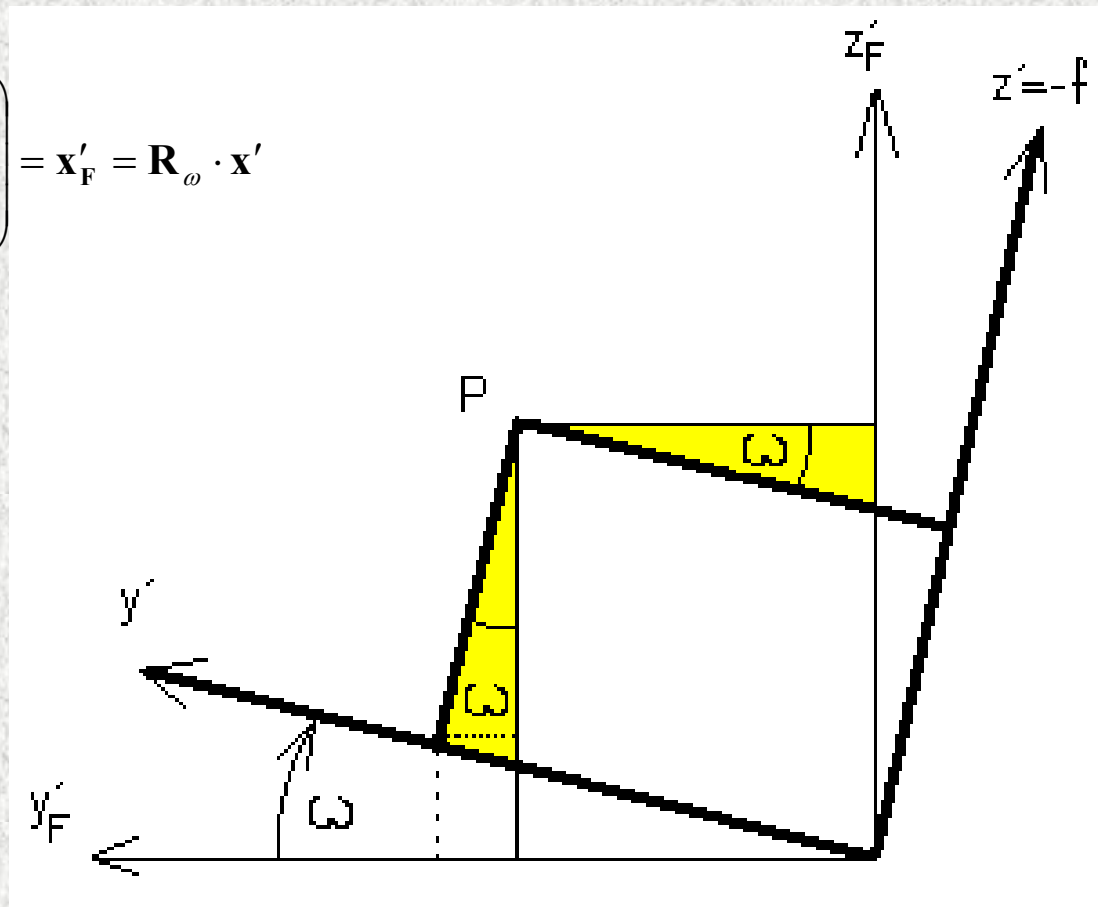
$$x'_F = x'$$

$$y'_F = y' \cdot \cos \omega - z' \cdot \sin \omega$$

$$z'_F = y' \cdot \sin \omega + z' \cdot \cos \omega$$

$$\begin{pmatrix} x'_F \\ y'_F \\ z'_F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \mathbf{x}'_F = \mathbf{R}_\omega \cdot \mathbf{x}'$$

Rotace systému kolem osy x' o úhel ω



Matice rotace



Rotace kolem sekundární osy y'

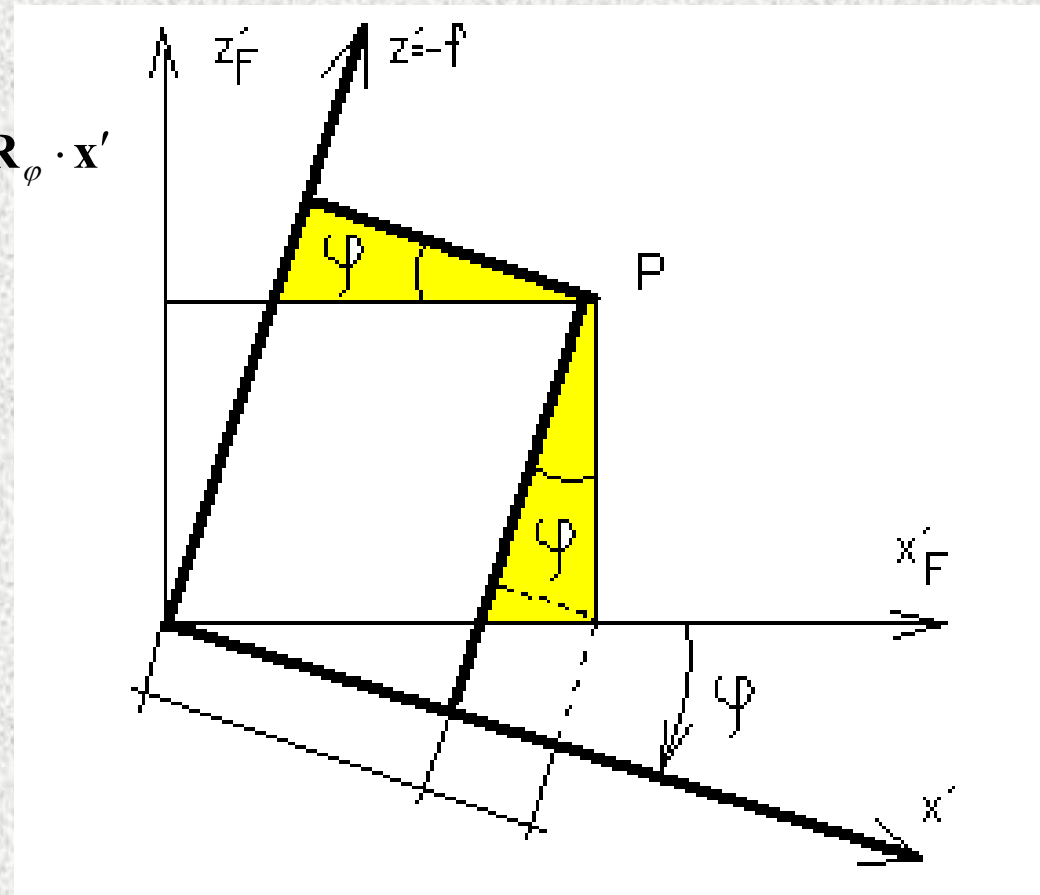
$$x'_F = x' \cdot \cos \varphi + z' \cdot \sin \varphi$$

$$y'_F = y'$$

$$z'_F = -x' \cdot \sin \varphi + z' \cdot \cos \varphi$$

$$\begin{pmatrix} x'_F \\ y'_F \\ z'_F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \mathbf{x}'_F = \mathbf{R}_\varphi \cdot \mathbf{x}'$$

Rotace systému kolem osy y' o úhel φ



Matice rotace



Rotace kolem terciální osy z'

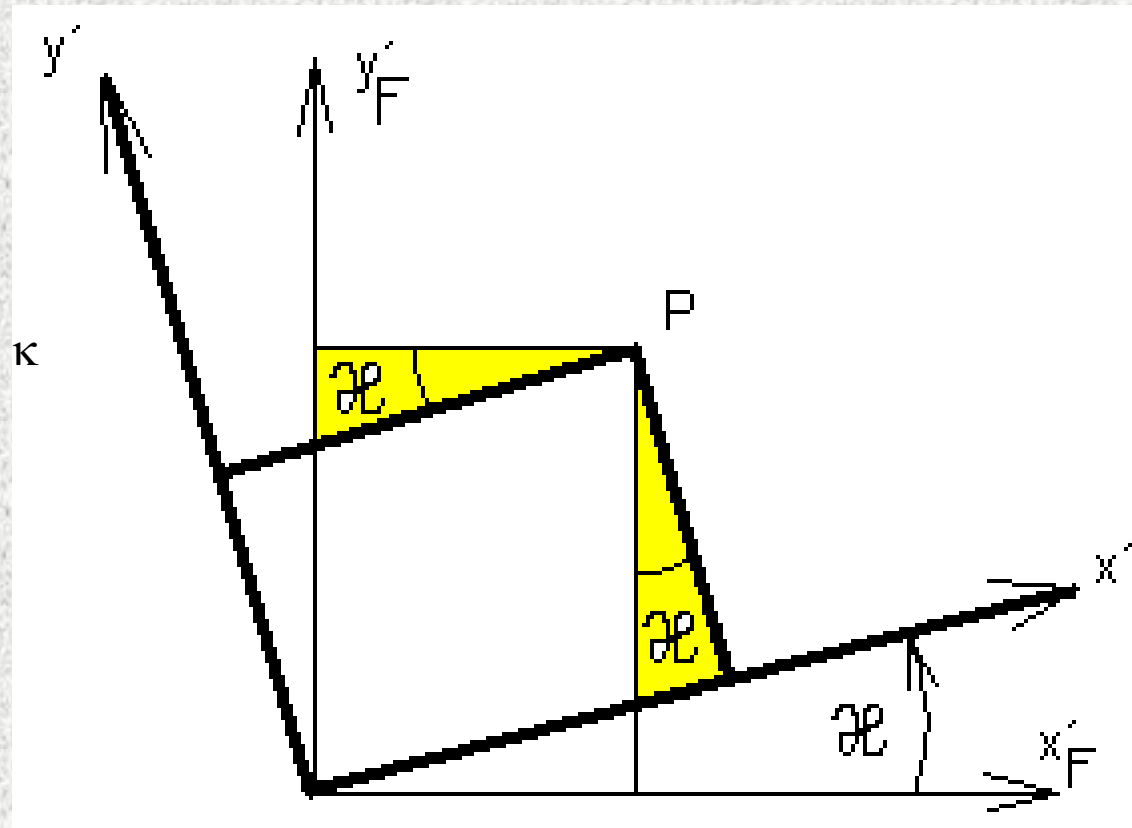
$$\begin{pmatrix} x'_F \\ y'_F \\ z'_F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \mathbf{x}'_F = \mathbf{R}_\kappa \cdot \mathbf{x}'$$

$$x'_F = x' \cdot \cos \kappa - y' \cdot \sin \kappa$$

$$y'_F = x' \cdot \sin \kappa + y' \cdot \cos \kappa$$

$$z'_F = z'$$

Rotace systému kolem osy z' o úhel κ



Matice rotace



Výsledná matice rotace R

$$\mathbf{R}_{\omega\varphi} = \mathbf{R}_{\omega} \cdot \mathbf{R}_{\varphi}$$

$$\mathbf{R}_{\omega\varphi\kappa} = \mathbf{R}_{\omega\varphi} \cdot \mathbf{R}_{\kappa}$$

$$\mathbf{R}_{\omega\varphi\kappa} = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & -\cos \varphi \sin \kappa & \sin \varphi \\ \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa & -\sin \omega \sin \varphi \sin \kappa + \cos \omega \cos \kappa & -\sin \omega \cos \varphi \\ -\cos \omega \sin \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa & \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa + \sin \omega \cos \kappa & \cos \omega \cos \varphi \end{pmatrix}$$

$$\tan \omega = -\frac{r_{23}}{r_{33}}, \sin \varphi = r_{13}, \tan \kappa = -\frac{r_{12}}{r_{11}}$$

Zde je nutno si uvědomit, že $r_{13} = \sin \varphi > 0$ v 1. a 2. kvadrantu a dále že $r_{13} = \sin \varphi < 0$ ve 3. a 4. kvadrantu. Není tedy rotace φ určena jednoznačně. Kvadranty ostatních dvou rotací ω, κ jsou určeny vzhledem k výrazům, ze kterých je počítáme, jednoznačně. Dostáváme tedy k jedné matici rotace R celkem dvě sady rotací ω, φ, κ

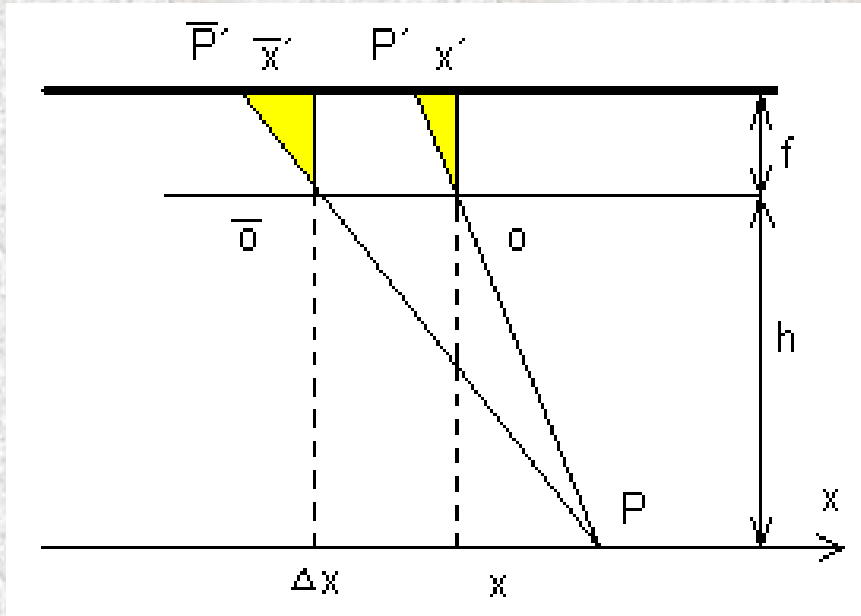
$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$$

Posun v prostoru



- lineární změny

Vliv změny souřadnice x



$$x = \frac{z}{z'} x' = \frac{h}{f} x'$$

$$x' = \frac{f}{h} x$$

$$\Delta x' = \frac{f}{h} \cdot \Delta x, \quad \Delta y' = 0, \quad \Delta z' = \Delta f = 0$$

Výraz f/h je v tomto případě měřítko snímku. Změny Δx , Δy , Δz v měřítku snímku se často z důvodu stejného významu na starých analogových strojích označují tradičně db_x , db_y , db_z . Výraz přejde na tvar:

$$\Delta x' = db_x, \quad \Delta y' = 0, \quad \Delta z' = \Delta f = 0$$

Posun v prostoru



Vliv změny souřadnice y (stejně, jako u souř. x)

$$\Delta x' = 0, \quad \Delta y' = \frac{f}{h} y, \quad \Delta z' = \Delta f = 0$$

Výraz f/h je v tomto případě měřítko snímku. Změny Δx , Δy , Δz v měřítku snímku se často z důvodu stejného významu na starých analogových strojích označují tradičně db_x , db_y , db_z . Výraz přejde na tvar:

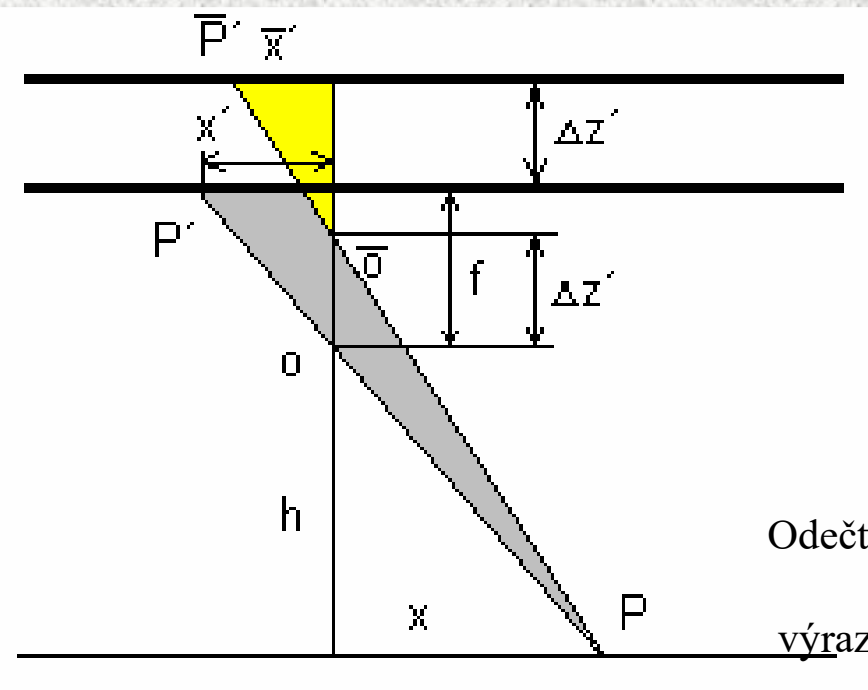
$$\Delta x' = 0, \quad \Delta y' = db_y, \quad \Delta z' = \Delta f = 0$$

Posun v prostoru



Vliv změny souřadnice z

- při změně výšky letu ovšem dochází ke změnám v obou snímkových souřadnicích



$$x = \frac{z}{z'} x' = \frac{h}{f} x', \quad y = \frac{z}{z'} y' = \frac{h}{f} y'$$

$$x' = \frac{f}{h} x, \quad y' = \frac{f}{h} y$$

$$\bar{x}' = \frac{f}{h + \Delta z} \cdot x, \quad \bar{y}' = \frac{f}{h + \Delta z} \cdot y$$

Odečteme-li rovnice, dostaneme po úpravě

$$\frac{1}{a \pm x} \cong \frac{1}{a} \left(1 \mp \frac{x}{a} \right)$$

výraz pro rozdíly ve snímkových souřadnicích :

$$\Delta x' = x' - \bar{x}' = \frac{x'}{h} \cdot \Delta z, \quad \Delta y' = y' - \bar{y}' = \frac{y'}{h} \cdot \Delta z$$

$$\Delta z = \Delta z' \cdot \frac{h}{f}$$

$$\Delta x' = \frac{x'}{f} db_z, \quad \Delta y' = \frac{y'}{f} db_z, \quad \Delta z' = \Delta f = 0$$



Změna měřítka

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = m \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \mathbf{M} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad \text{kde} \quad \mathbf{M} = \begin{pmatrix} m_X & 0 & 0 \\ 0 & m_Y & 0 \\ 0 & 0 & m_Z \end{pmatrix}$$

Převod informací ze snímku do geodetických systémů



1) Obnovení prvků vnitřní orientace

2) Vnější orientace

Vnější orientace lze řešit klasicky ve dvou krocích jako:

1. **-relativní orientaci** (vzájemná orientace mezi oběma stereosnímky, utvoření libovolně prostorově orientovaného stereomodelu)
2. **-absolutní orientaci** (pootočení a posun modelu do referenčního geodetického systému)
3. - v jednom kroku **metodou svazkového vyrovnání** (*Bundle Adjustment*, *Bündelausgleichung*)

Převody



$$\mathbf{x}', \mathbf{y}', \mathbf{z}' = (-f) \rightarrow \mathbf{x}'_F, \mathbf{y}'_F, \mathbf{z}'_F \rightarrow \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z} \rightarrow \mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$$

$$\begin{pmatrix} x'_F \\ y'_F \\ z'_F \end{pmatrix} = \mathbf{R} \cdot \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' = -f \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' = -f \end{pmatrix} = \mathbf{R}^T \cdot \begin{pmatrix} x'_F \\ y'_F \\ z'_F \end{pmatrix}$$

Dále platí podobnost:

$$\frac{x'_F}{z'_F} = \frac{x'_S}{z'_S} = \frac{x'_S}{-f} = \frac{x - x_0}{z - z_0}, \quad \frac{y'_F}{z'_F} = \frac{y'_S}{z'_S} = \frac{y'_S}{-f} = \frac{y - y_0}{z - z_0}$$

Dosazením dostaneme **kolineární vztah**:

$$x'_s = -f \frac{r_{11}x' + r_{12}y' - r_{13}f}{r_{31}x' + r_{32}y' - r_{33}f}, \quad y'_s = -f \frac{r_{11}x' + r_{12}y' - r_{13}f}{r_{31}x' + r_{32}y' - r_{33}f}$$

Převody



$$x = x_0 + (z - z_0) \frac{r_{11}(x' - x'_0) + r_{12}(y' - y'_0) - r_{13}f}{r_{31}(x' - x'_0) + r_{32}(y' - y'_0) - r_{33}f}$$
$$y = y_0 + (z - z_0) \frac{r_{21}(x' - x'_0) + r_{22}(y' - y'_0) - r_{23}f}{r_{31}(x' - x'_0) + r_{32}(y' - y'_0) - r_{33}f}$$

Častější tvar, protože můžeme přiřadit výhodně opravy snímkových souřadnicím a vztah linearizovat :

$$x' = x'_0 - f \frac{r_{11}(x - x_0) + r_{21}(y - y_0) + r_{31}(z - z_0)}{r_{13}(x - x_0) + r_{23}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)}$$
$$y' = y'_0 - f \frac{r_{12}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) + r_{32}(z - z_0)}{r_{13}(x - x_0) + r_{23}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)}$$

Přímý vztah mezi snímkovými a geodetickými souřadnicemi



kolineární vztah snímek-model

$$\frac{x' - x'_0}{-f} = \frac{x - x_0}{z - z_0}, \quad \frac{y' - y'_0}{-f} = \frac{y - y_0}{z - z_0}$$

$$\begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} = \mathbf{R} \cdot \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$$

systém modelových souřadnic lze převést rotacemi kolem tří os na systém geodetický

$$\begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{pmatrix} = \mathbf{R}^T \cdot \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix}$$

přímý vztah mezi snímkovými a geodetickými souřadnicemi, který je základem celé současné fotogrammetrie:

$$x' = x'_0 - f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y' = y'_0 - f \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

Přímý vztah - transformace



$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} + m \cdot R \cdot \begin{bmatrix} x' - x'_o \\ y' - y'_o \\ -f \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} + m \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x' - x'_o \\ y' - y'_o \\ -f \end{bmatrix}$$
$$\begin{aligned} X &= X_o + m \cdot (r_{11} \cdot (x' - x'_o) + r_{12} \cdot (y' - y'_o) - r_{13} \cdot f) \\ Y &= Y_o + m \cdot (r_{21} \cdot (x' - x'_o) + r_{22} \cdot (y' - y'_o) - r_{23} \cdot f) \\ Z &= Z_o + m \cdot (r_{31} \cdot (x' - x'_o) + r_{32} \cdot (y' - y'_o) - r_{33} \cdot f) \end{aligned}$$

$$m = \frac{Z - Z_o}{r_{31} \cdot (x' - x'_o) + r_{32} \cdot (y' - y'_o) - r_{33} \cdot f}$$

$$X = X_o + (Z - Z_o) \cdot \frac{r_{11} \cdot (x' - x'_o) + r_{12} \cdot (y' - y'_o) - r_{13} \cdot f}{r_{31} \cdot (x' - x'_o) + r_{32} \cdot (y' - y'_o) - r_{33} \cdot f}$$

$$Y = Y_o + (Z - Z_o) \cdot \frac{r_{21} \cdot (x' - x'_o) + r_{22} \cdot (y' - y'_o) - r_{23} \cdot f}{r_{31} \cdot (x' - x'_o) + r_{32} \cdot (y' - y'_o) - r_{33} \cdot f}$$

Fotogrammetrické řady



Definice:

Fotogrammetrické řady jsou výrazy, které s jistým stupněm přesnosti, který dává linearizace úplného vztahu, vyjadřují vliv prvků vnější orientace na snímkové souřadnice.

Linearizace matice rotace (do 2°-3°)

$\cos(\alpha) \cong 1$ a dále $\sin(\alpha) \cong d\alpha$

$$d\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & -d\kappa & d\varphi \\ d\kappa & 1 & -d\omega \\ -d\varphi & d\omega & 1 \end{pmatrix}$$

$$x = x_0 + (z - z_0) \frac{r_{11}(x' - x'_0) + r_{12}(y' - y'_0) - r_{13}f}{r_{31}(x' - x'_0) + r_{32}(y' - y'_0) - r_{33}f}$$

$$y = y_0 + (z - z_0) \frac{r_{21}(x' - x'_0) + r_{22}(y' - y'_0) - r_{23}f}{r_{31}(x' - x'_0) + r_{32}(y' - y'_0) - r_{33}f}$$

Fotogrammetrické řady



$$x'_s = -f \frac{r_{11}x' + r_{12}y' - r_{13}f}{r_{31}x' + r_{32}y' - r_{33}f}, \quad y'_s = -f \frac{r_{21}x' + r_{22}y' - r_{23}f}{r_{31}x' + r_{32}y' - r_{33}f}$$

pro malé úhly za použití linearizované matice rotace

$$x'_s = -f \frac{x' - y'd\kappa' - f d\varphi'}{-x'd\varphi' + y'd\omega' - f} \quad y'_s = -f \frac{x'd\kappa' + y' + f d\omega'}{-x'd\varphi' + y'd\omega' - f}$$

další postup je analogický pro x'_s, y'_s

$$\left(-x'd\varphi' + y'd\omega' - f\right)x'_s = -f\left(x' - y'd\kappa' - f d\varphi'\right)$$

po vydělení $-f$

$$\left(1 - \frac{y'd\omega'}{f} + \frac{x'd\varphi'}{f}\right)x'_s = \left(x' - y'd\kappa' - f d\varphi'\right)$$

Fotogrammetrické řady



$$x'_s = (x' - y'd\kappa' - f d\varphi') \left[1 - \left(\frac{y'd\omega'}{f} - \frac{x'd\varphi'}{f} \right) \right]^{-1}$$

$$x'_s = A \cdot [1 - B]^{-1} \approx A \cdot (1 + B) = A + AB$$

$$\Delta x' = x'_s - x' = -y'd\kappa' - \left(f + \frac{x'^2}{f} \right) d\varphi' + \frac{x'y'}{f} d\omega'$$

$$\Delta y' = y'_s - y' = x'd\kappa' - \frac{x'y'}{f} d\varphi' + \left(f + \frac{y'^2}{f} \right) d\omega'$$

Fotogrammetrické řady



nakonec je třeba tyto výrazy doplnit o vliv translace

$$\Delta x' = -y' d\kappa' - \left(f + \frac{x'^2}{f} \right) d\varphi' + \frac{x'y'}{f} d\omega' + db'_x + \frac{x'}{f} db'_z$$

$$\Delta y' = x' d\kappa' - \frac{x'y'}{f} d\varphi' + \left(f + \frac{y'^2}{f} \right) d\omega' + db'_y + \frac{y'}{f} db'_z$$

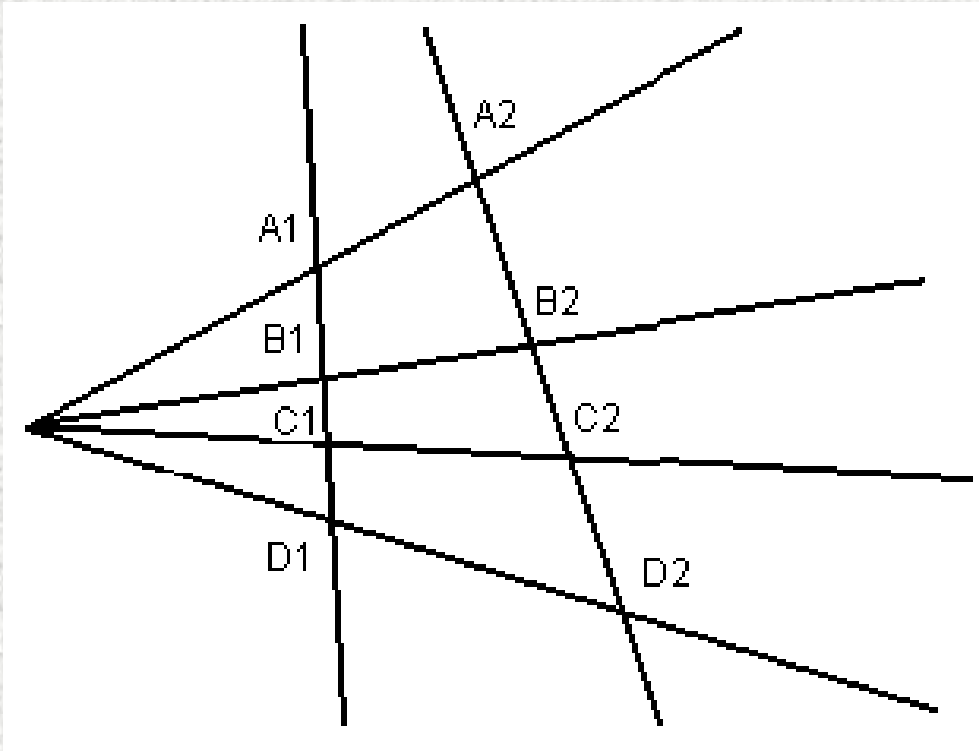
Výraz se nazývá „**úplné fotogrammetrické řady**“, případně historicky Gruberovy řady a používá se jich při zjednodušených teoretických odvozeních. Význam a využívání řad mělo zcela zásadní charakter zejména v době analogové fotogrammetrie.

Metody fotogrammetrie

Jednosnímková fotogrammetrie



- vztah mezi dvěma rovinami



Pappova věta:

Dvojpoměr čtveřice bodové nebo paprskové zůstává v rovině mapy i snímku zachován.

$$\frac{A_1C_1}{B_1C_1} = \frac{A_2C_2}{B_2C_2}$$
$$\frac{A_1D_1}{B_1D_1} = \frac{A_2D_2}{B_2D_2}$$

Matematickým vyjádřením skutečnosti je **kolineární transformace**

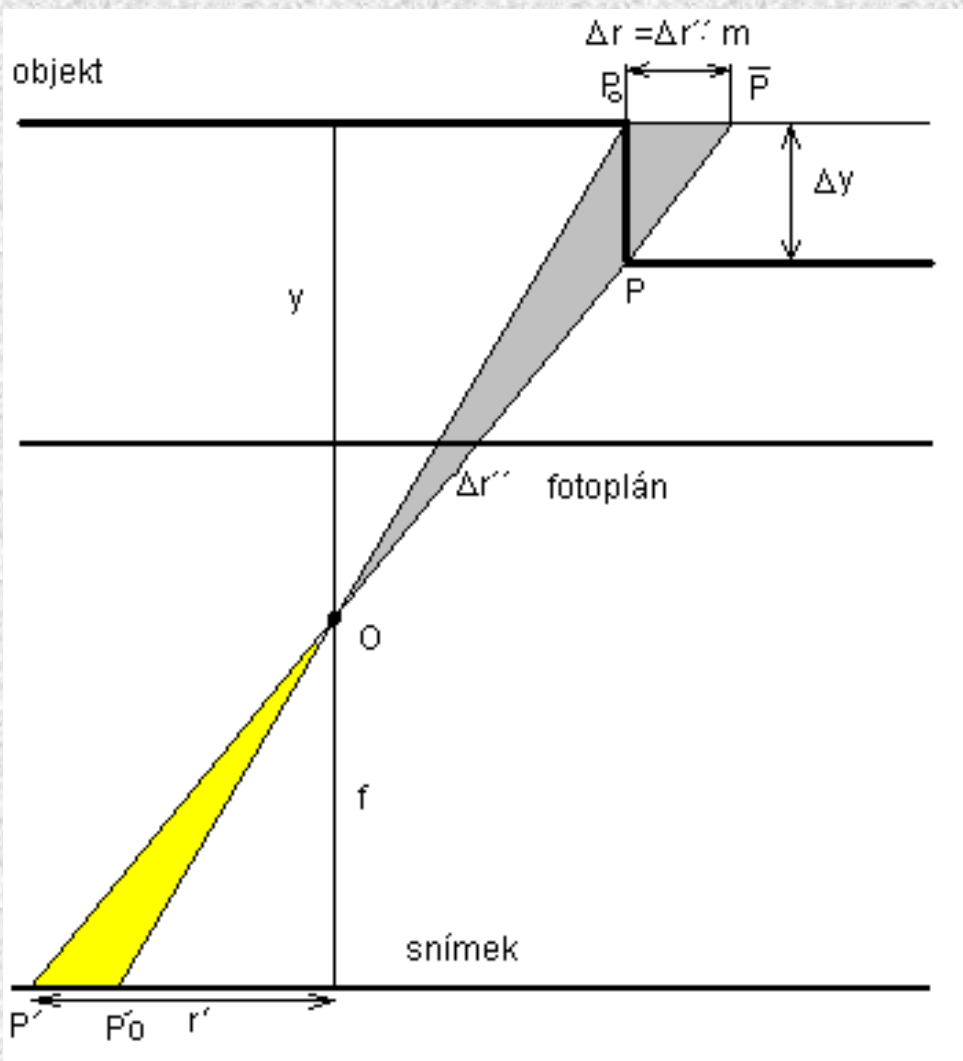
$$X = \frac{a_1x' + a_2y' + a_3}{c_1x' + c_2y' + 1}$$

$$Y = \frac{b_1x' + b_2y' + b_3}{c_1x' + c_2y' + 1}$$

Vliv hloubkového členění



$$\Delta r = \Delta r'' \cdot m_F, \quad \frac{\Delta r}{\Delta y} = \frac{r'}{f}, \quad \Delta r'' = \frac{\Delta y \cdot r'}{f \cdot m_F}$$

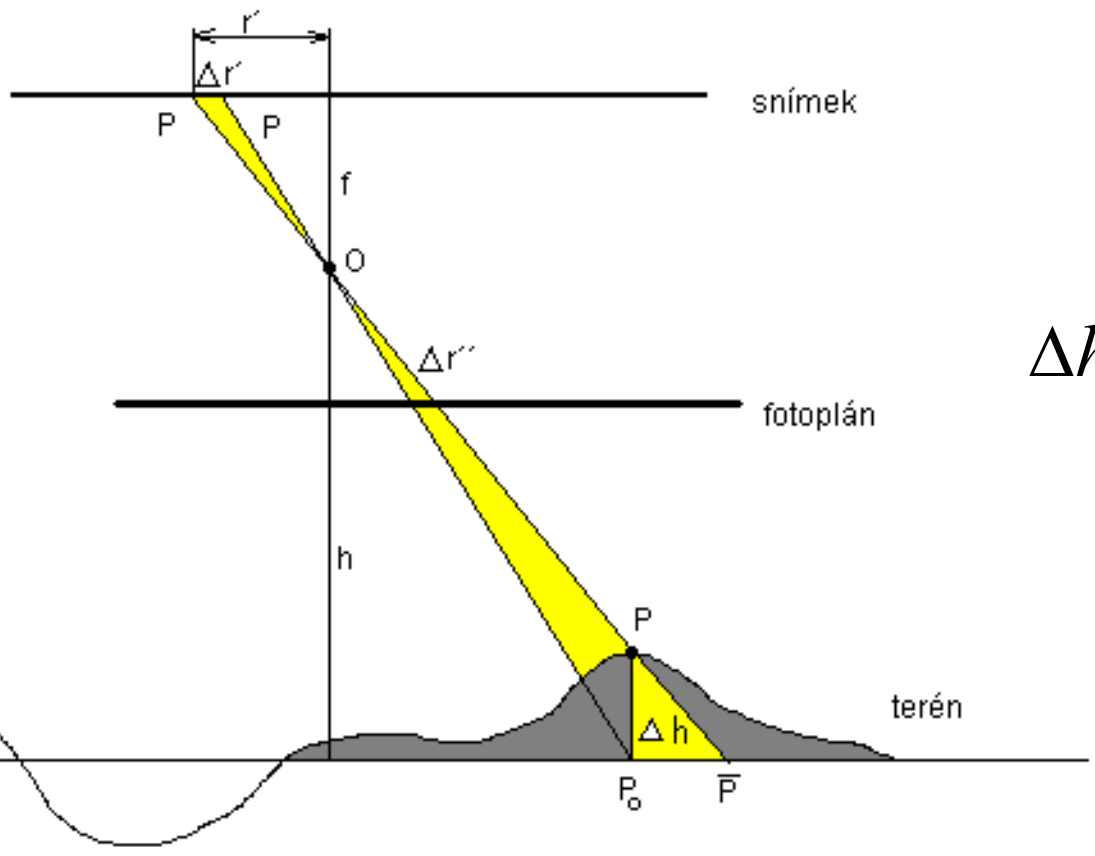


$$\Delta y_{\max} = \frac{f \cdot m_F \cdot \Delta r''_{\max}}{r'}$$

Vliv výškového členění



$$\Delta r'' = \frac{\Delta h \cdot r'}{f \cdot m_F}$$

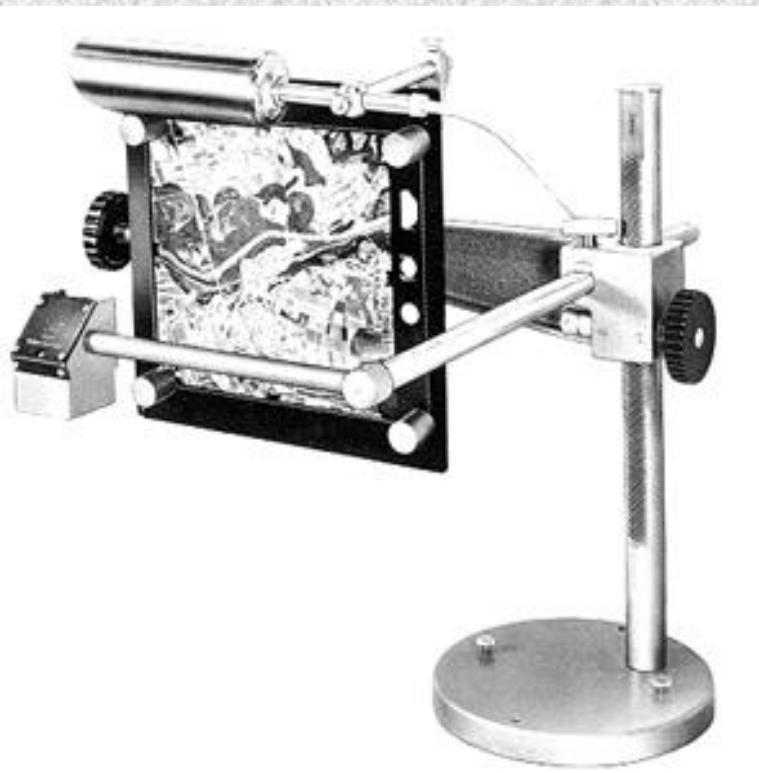


$$\Delta h_{\max} = \frac{f \cdot m_F \cdot \Delta r''_{\max}}{r'}$$

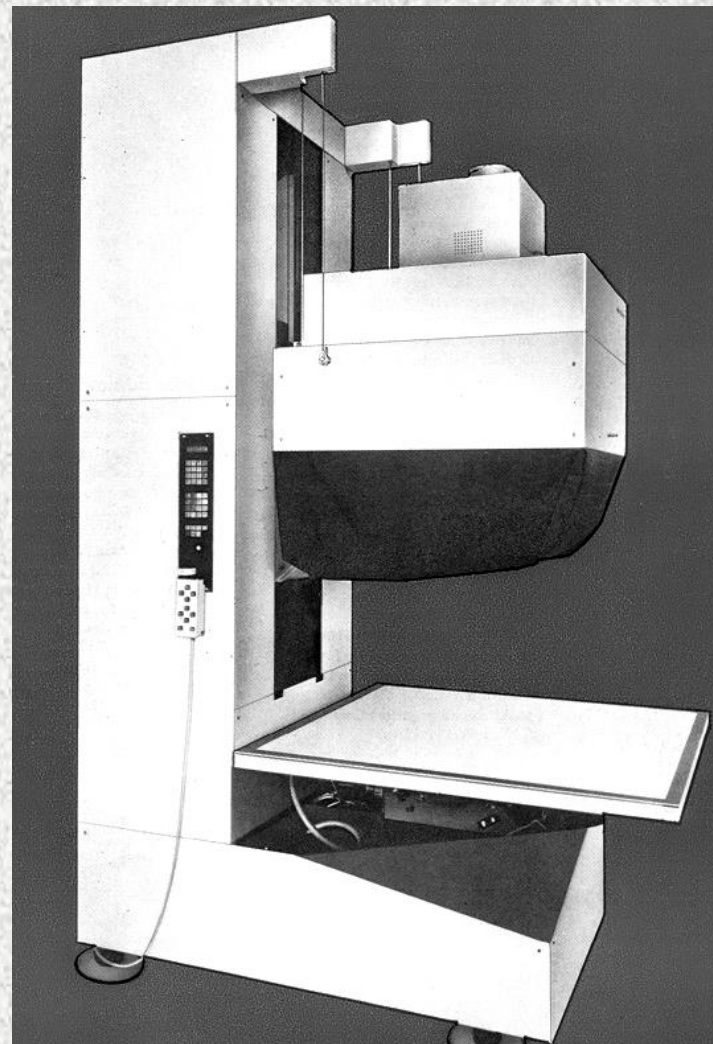
Metody vyhodnocení jednosnímkové fotogrammetrie



Obkreslovač



Překreslovač



Digitální překreslení



Originální snímek a fotoplán, pořízený měřickou komorou (vlevo), snímek, pořízený obyčejným fotoaparát a jeho digitálně překreslená podoba – zaklenuí obrazu, vlivem neodstraněné radiální distorze je jasně viditelné (vpravo)

Řešení



$$X = \frac{a_1 x' + a_2 y' + a_3}{c_1 x' + c_2 y' + 1}$$

$$Y = \frac{b_1 x' + b_2 y' + b_3}{c_1 x' + c_2 y' + 1}$$

$$X = a_1 x' + a_2 y' + a_3 - c_1 x' X - c_2 y' X$$

$$Y = b_1 x' + b_2 y' + b_3 - c_1 x' Y - c_2 y' Y$$

$$\begin{pmatrix} x'_1 & y'_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_1 X_1 & -y'_1 Y_1 \\ 0 & 0 & 0 & x'_1 & y'_1 & 1 & -x'_1 Y_1 & -y'_1 X_1 \\ x'_2 & y'_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_2 X_2 & -y'_2 Y_2 \\ 0 & 0 & 0 & x'_2 & y'_2 & 1 & -x'_2 Y_2 & -y'_2 X_2 \\ x'_3 & y'_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_3 X_3 & -y'_3 Y_3 \\ 0 & 0 & 0 & x'_3 & y'_3 & 1 & -x'_3 Y_3 & -y'_3 X_3 \\ x'_4 & y'_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_4 X_4 & -y'_4 Y_4 \\ 0 & 0 & 0 & x'_4 & y'_4 & 1 & -x'_4 Y_4 & -y'_4 X_4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ X_2 \\ Y_2 \\ X_3 \\ Y_3 \\ X_4 \\ Y_4 \end{pmatrix}$$

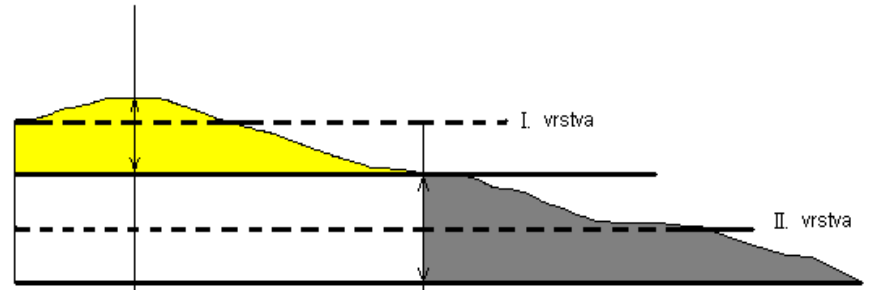
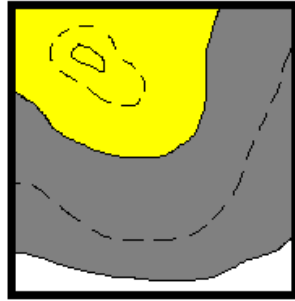
$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{a} = \mathbf{X}$$

$$\mathbf{a} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{X}$$

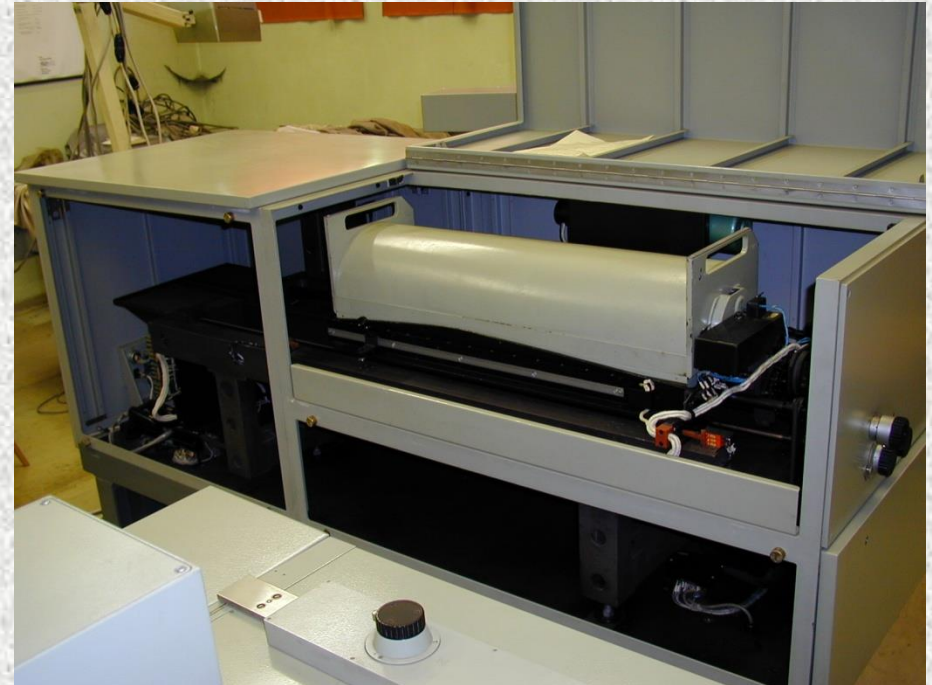
Možnosti



Překreslení po vrstvách



Diferenciální překreslení



Digitální ortofoto

Digitální ortofoto

Digitální ortofoto je fotogrammetrický produkt – převod snímků se středovým promítáním na ortogonální promítání

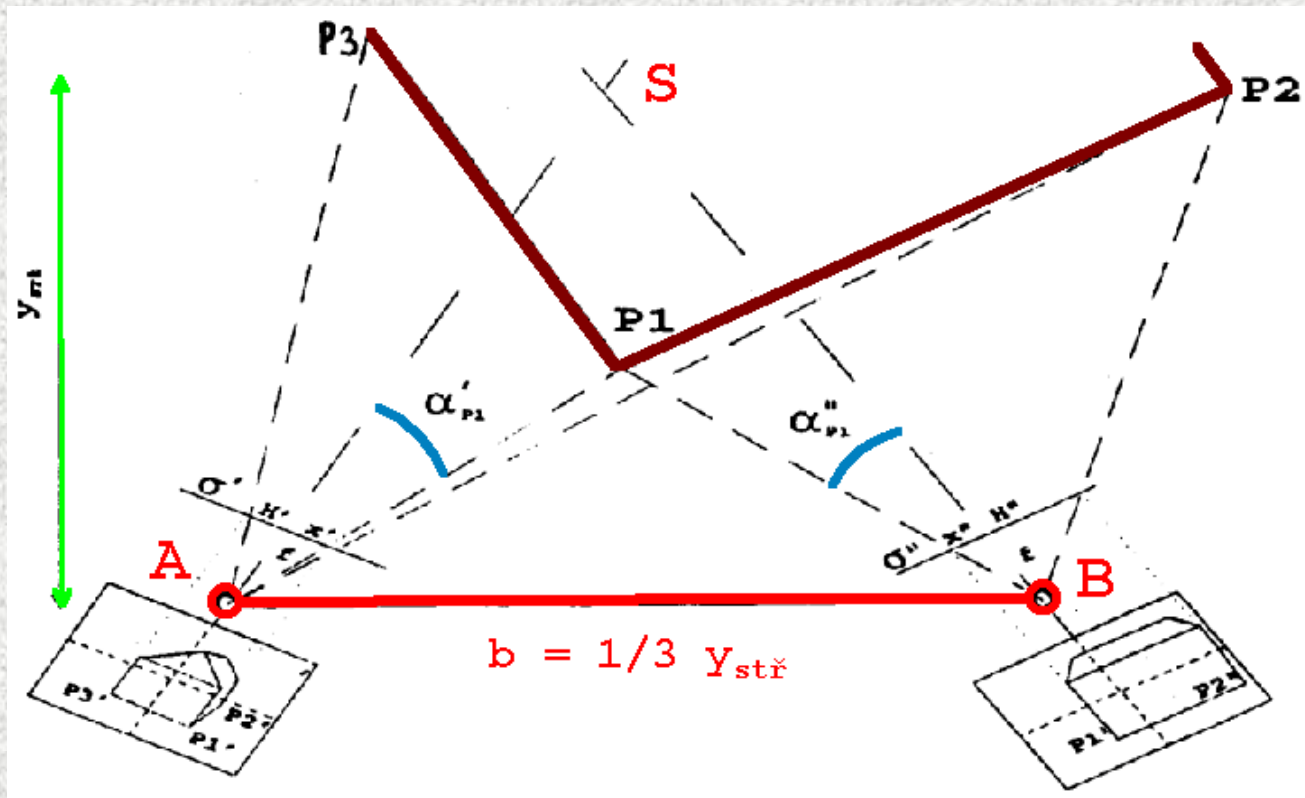


*Pro tvorbu:
nutný snímek se
známými prvky vnitřní
i vnější orientace a
DMR*

*Problém mozaikování
– bezešvé ortofoto*



Vícesnímková fotogrammetrie - průseková



- Nejstarší fotogrammetrická metoda
- založeno na protínání paprsků
 - dnes pouze v digitální podobě

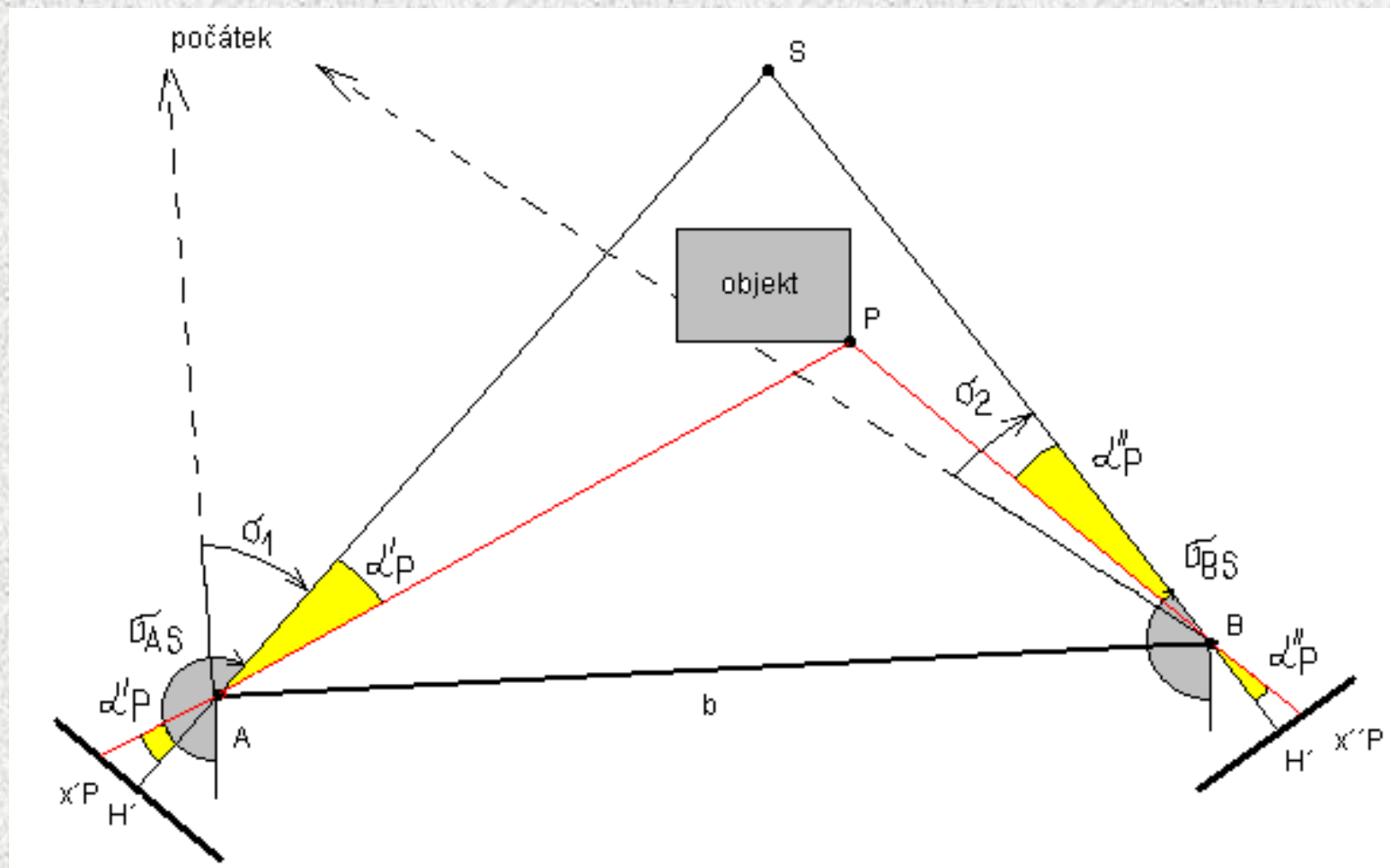
Historické řešení



$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{x'}{f}, \quad \operatorname{tg} \beta' = \frac{z'}{\sqrt{(f^2 + x'^2)}} = \frac{z'}{f} \cos \alpha'$$

$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{x'}{f}, \quad \operatorname{tg} \beta' = \frac{z'}{\sqrt{(f^2 + x'^2)}} = \frac{z'}{f} \cos \alpha'$$

$$x' = f \frac{x'_F}{f \cdot \cos \omega - z'_F \cdot \sin \omega}, \quad z' = f \frac{f \cdot \sin \omega + z'_F \cdot \cos \omega}{f \cdot \cos \omega - z'_F \cdot \sin \omega}$$



Dnešní řešení

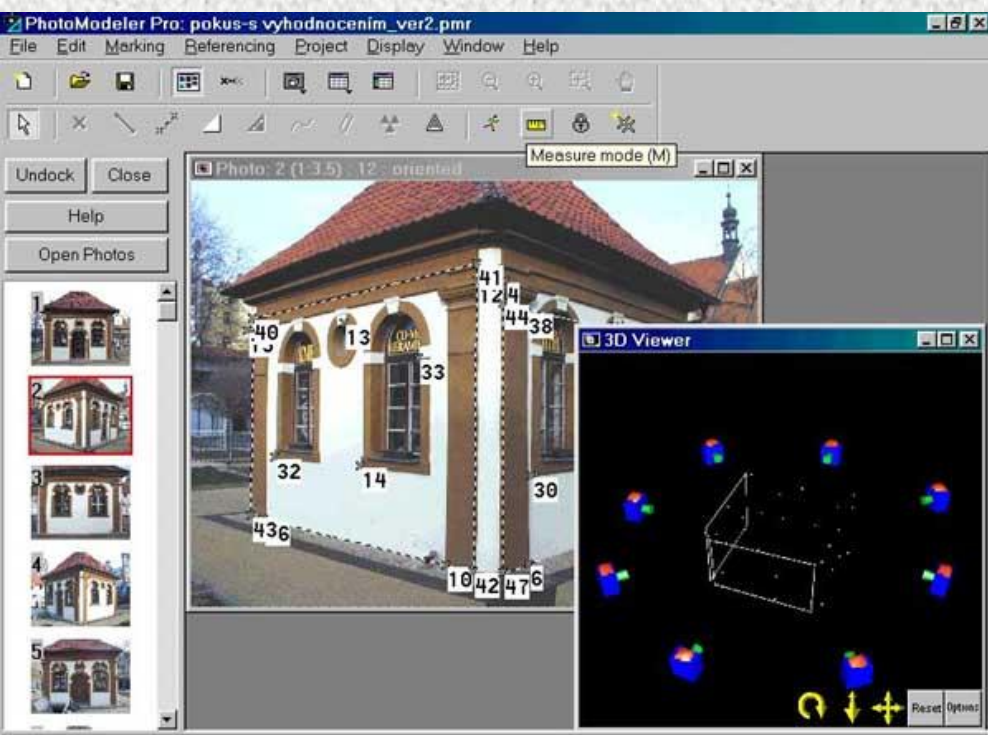
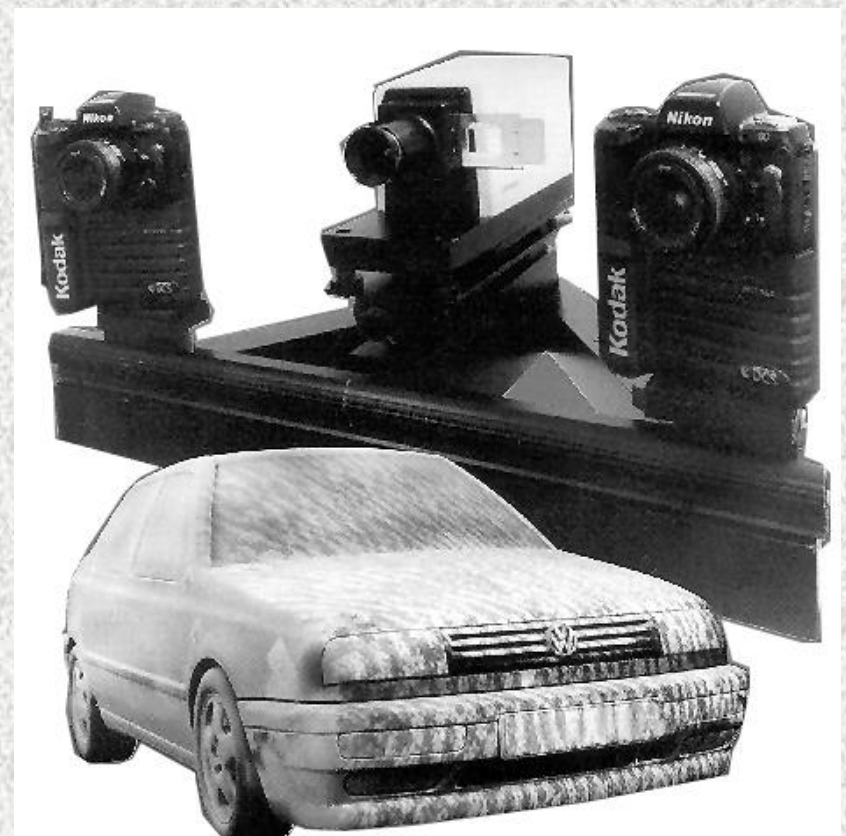
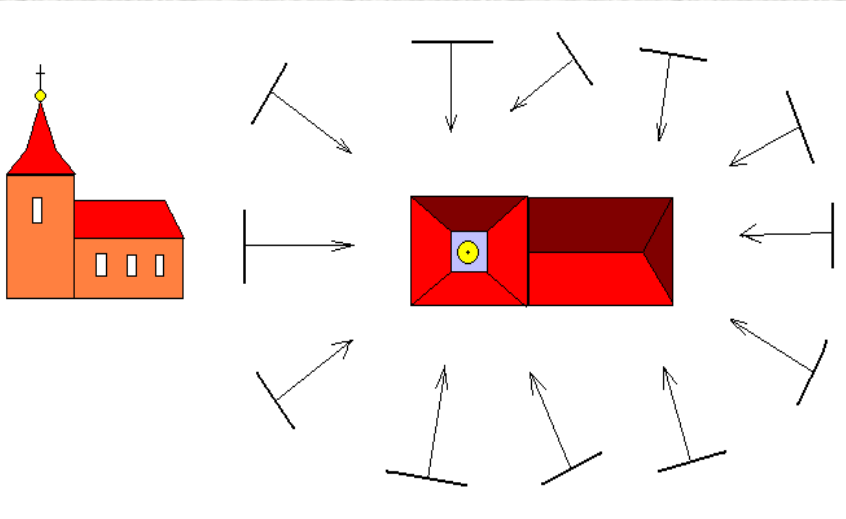


$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(x' - x'_0) + r_{12}(y' - y'_0) - r_{13}f}{r_{31}(x' - x'_0) + r_{32}(y' - y'_0) - r_{33}f}$$

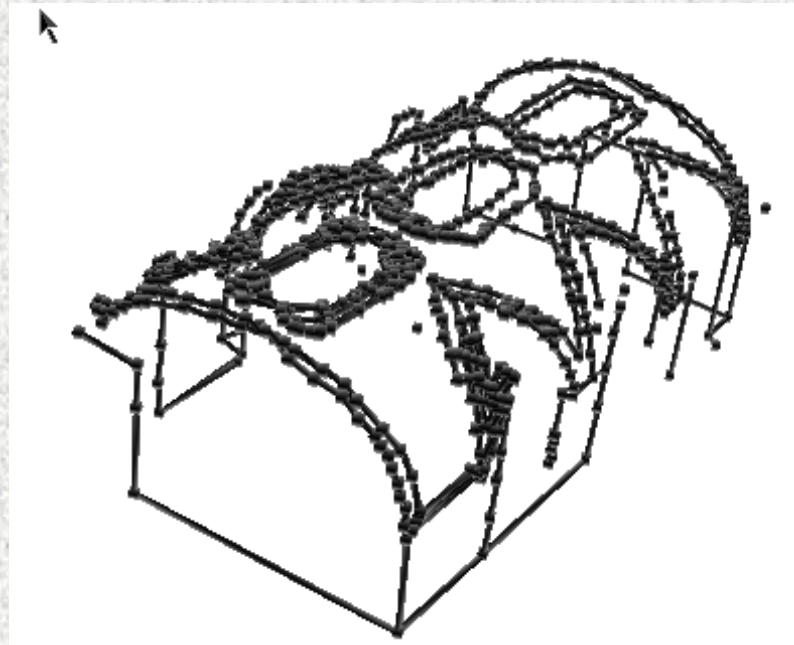
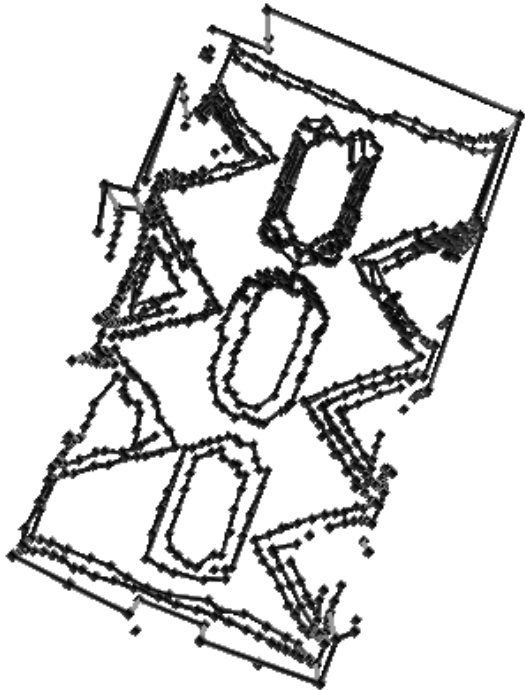
$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(x' - x'_0) + r_{22}(y' - y'_0) - r_{23}f}{r_{31}(x' - x'_0) + r_{32}(y' - y'_0) - r_{33}f}$$

$$\begin{pmatrix} x' - x'_0 + \Delta x' \\ y' - y'_0 + \Delta y' \\ -f \end{pmatrix} = m \cdot \mathbf{R}^T \cdot \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix}$$

Průseková fotogrammetrie



*Dokumentace prostorově členěné klenby v historickém objektu
Nerudovy ulice průsekovou fotogrammetrií
(sw Photomodeler)*



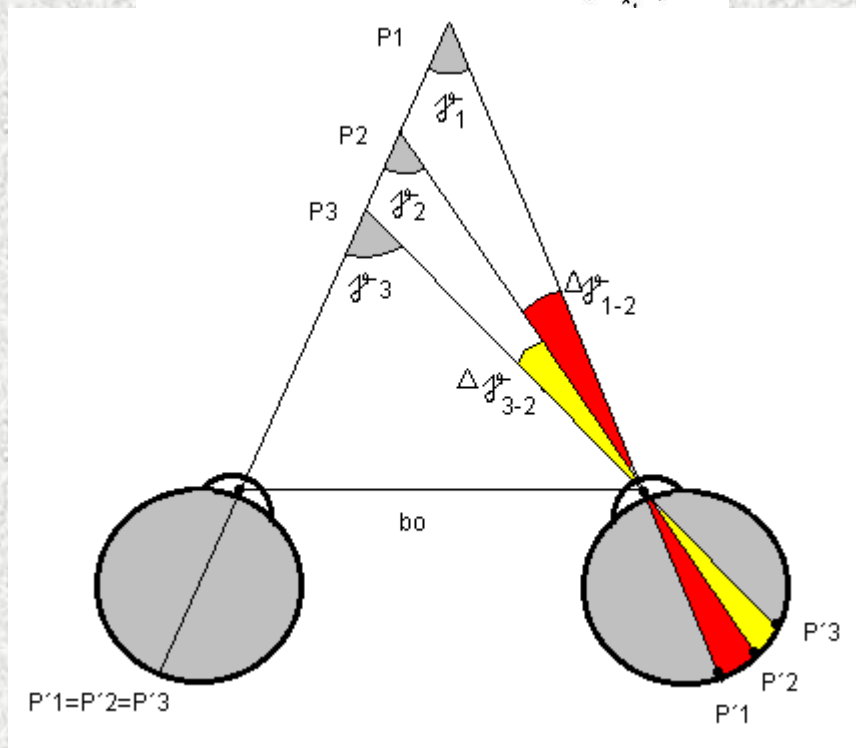
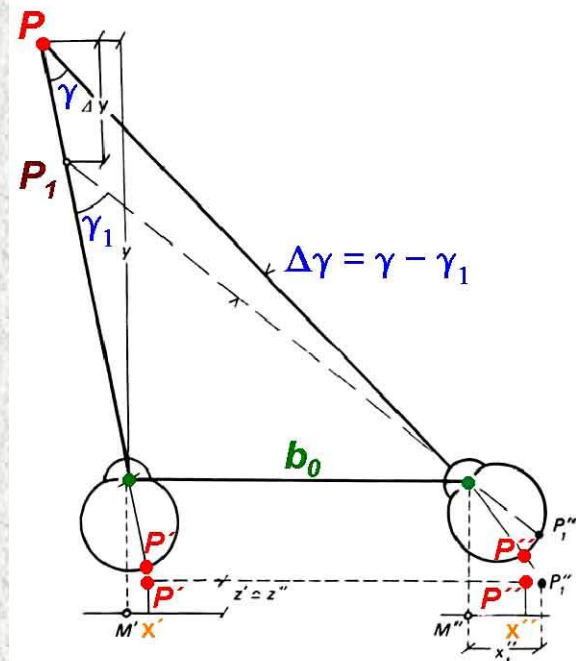
Stereofotogrammetrie

Stereofotogrammetrická metoda zavedena počátkem 20.stol. (Pulfrich)

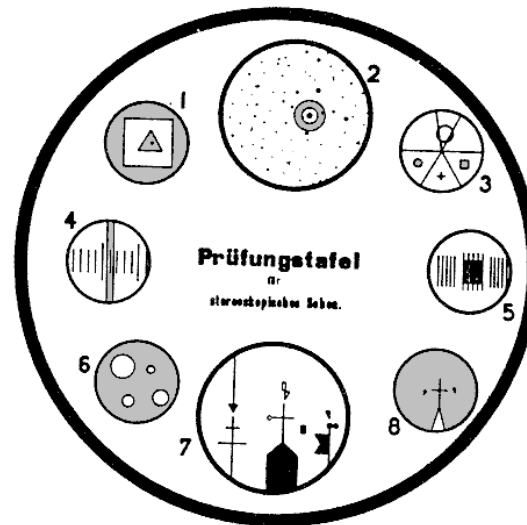
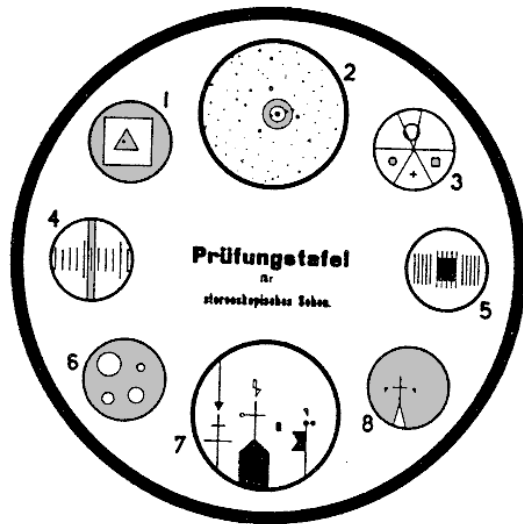
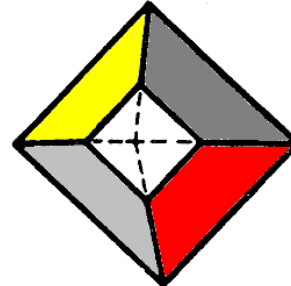
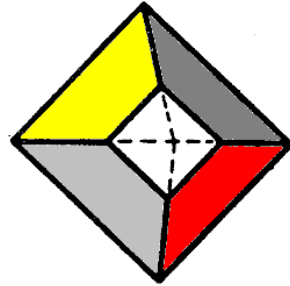
Vyhodnocení na základě stereoskopického vjemu i pro nesignalizované body

Fotogrammetrické stereoskopické pozorování a vyhodnocení

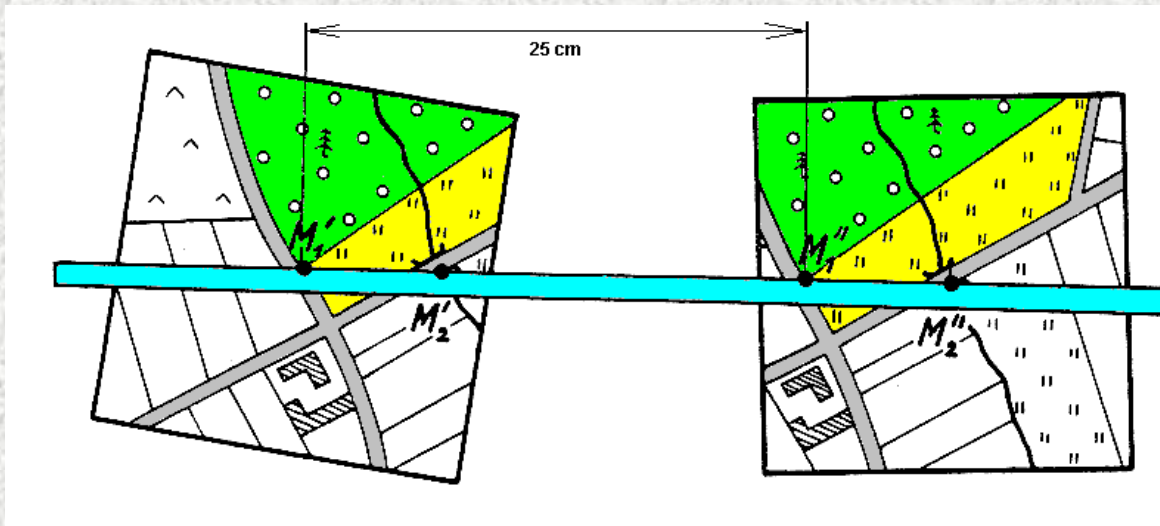
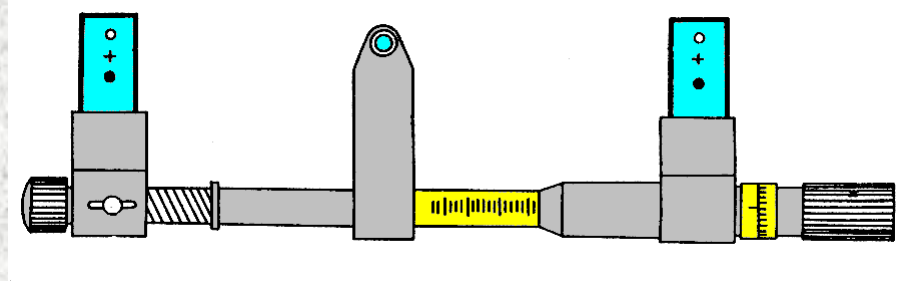
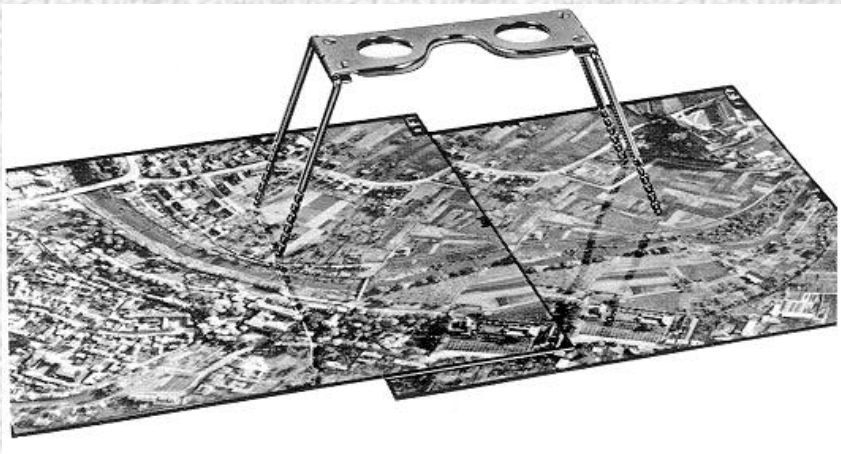
- umělý stereoskopický vjem na základě přirozeného vjemu zdravých očí



Stereoskopie



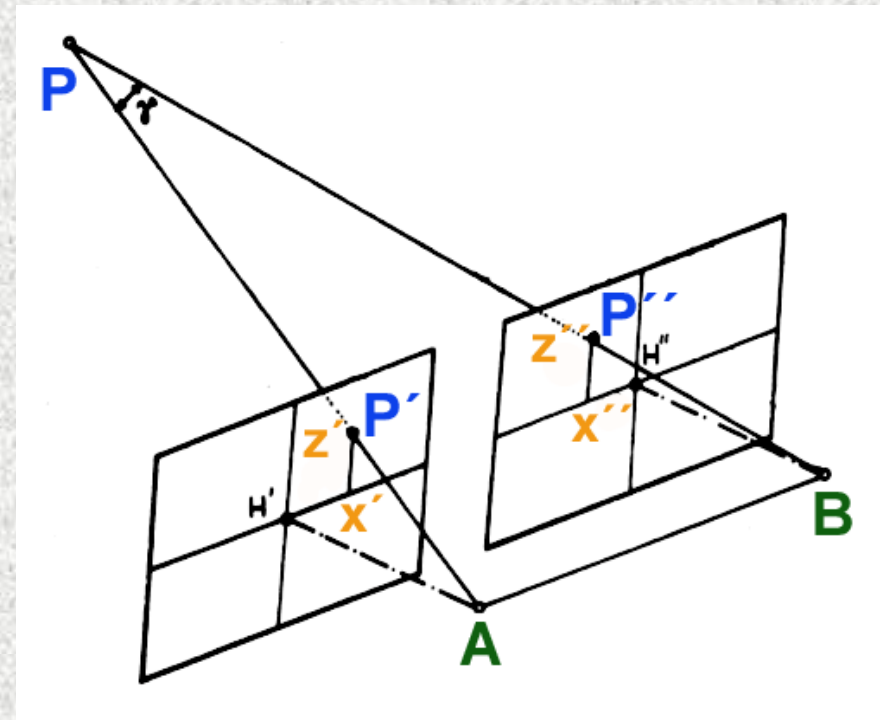
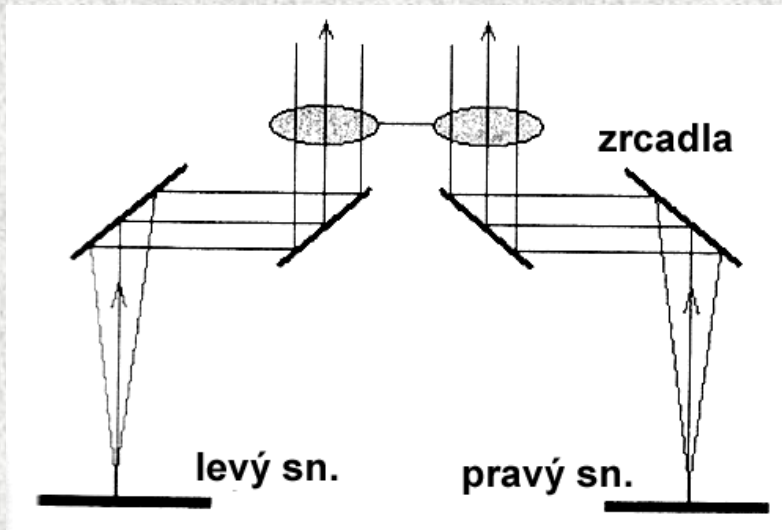
Stereoskopie



Stereofotogrammetrie



Podmínky vzniku umělého stereokopického vjemu: současně odděleně pozorují oba snímky



1. horizontální paralaxy jsou nenulové,

$$\underline{p = x' - x'' = 0}$$

2. vertikální paralaxy jsou nulové

$$\underline{q = y' - y'' (= z' - z'') = 0}$$

Stereofotogrammetrie

Vyhodnocení obsahu snímků na základě stereoskopického vjemu, převod snímkových souřadnic na geodetické

starší postup převodu

$$x', y', (f) \Rightarrow x'_F, y'_F, z'_F \Rightarrow x, y, z \Rightarrow X, Y, Z$$

fiktivní sn. model geod. systém

snímek

⇒ řešeno procesem snímkových orientací

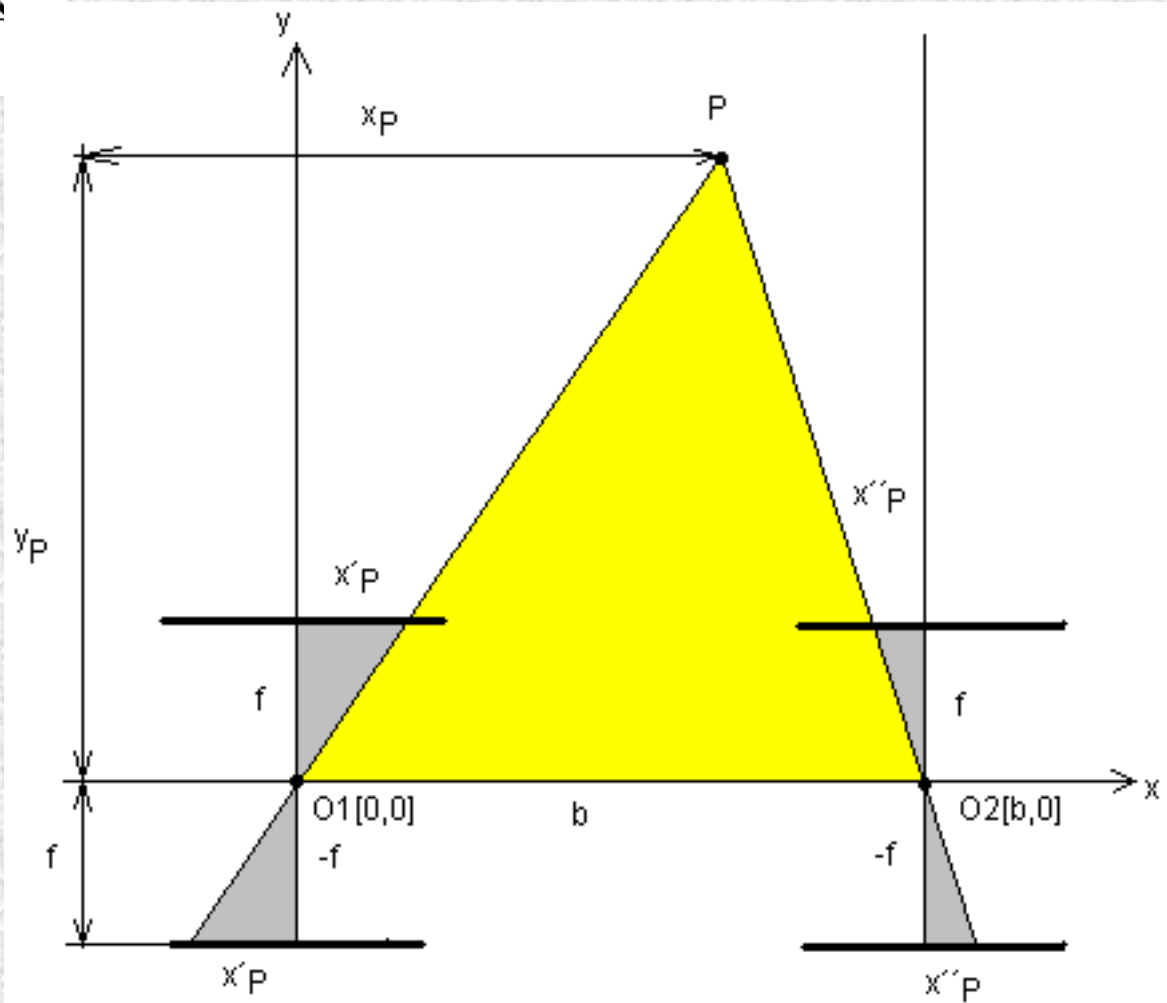
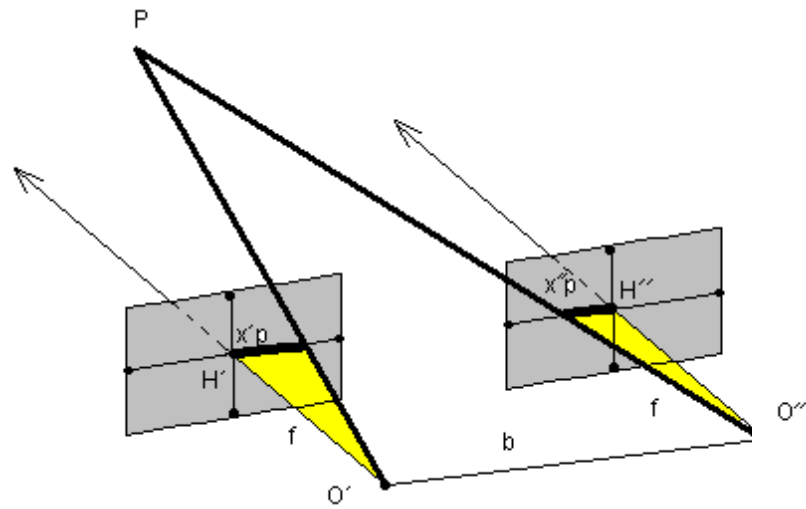
přímý vztah

$$x', y', (f) \Rightarrow X, Y, Z$$

snímek geod. systém

⇒ základ moderní digitální fotogrammetrie

Řešení



Pozemní stereofotogrammetrie – normální případ

Při pozemních aplikacích lze
zajistit standardizaci prvků
vnější orientace **R=E**

$$x = \frac{b \cdot x'}{p} \quad y = \frac{b \cdot f}{p} \quad z = \frac{b \cdot z'}{p}$$

b (AB) ⇒ základna

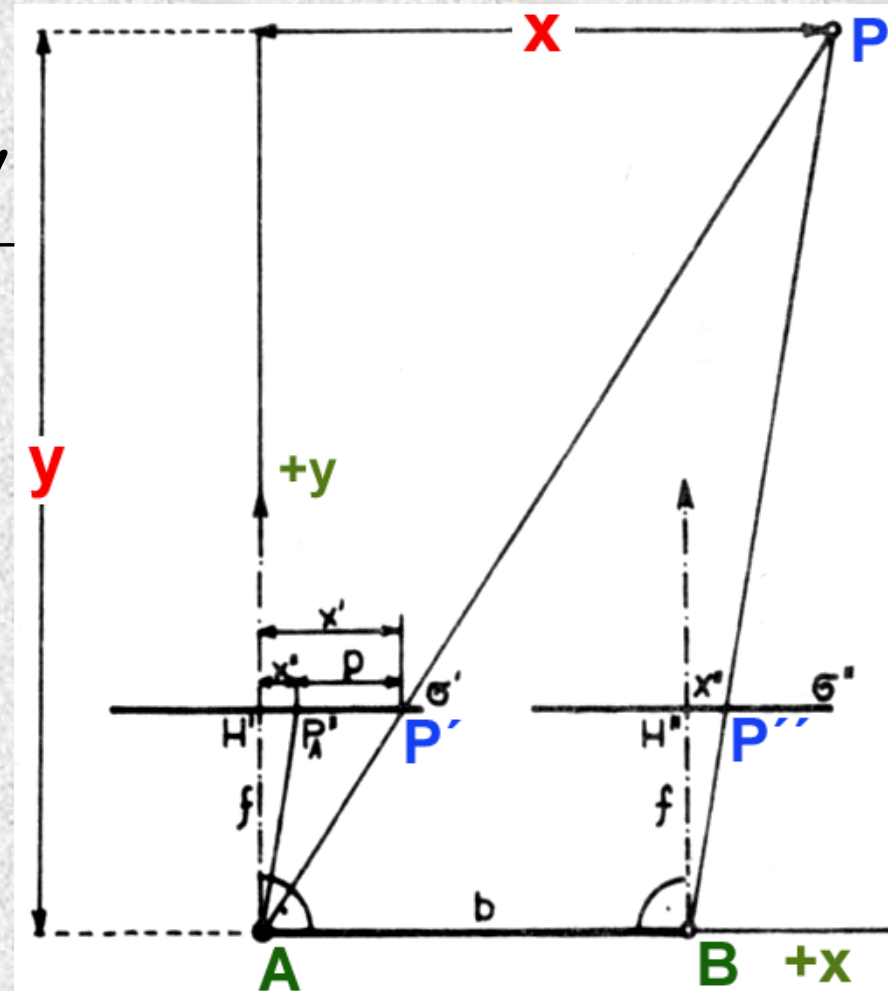
x y (z) ⇒ modelový systém

σ' , σ'' ⇒ snímkové roviny

x' , x'' , z' , z'' ⇒ snímkové
souřadnice

p ⇒ paralaxa

f ⇒ konstanta komory



Přesnost fotogrammetrie



$$\frac{y}{f} = \frac{b}{p}$$

$$x = \frac{b \cdot x'}{p} \quad y = \frac{b \cdot f}{p} \quad z = \frac{b \cdot z'}{p}$$

$$x = y \frac{x'}{f} \quad z = y \frac{z'}{f}$$

$$y = \frac{b \cdot f}{p}, \quad dy = \frac{f}{p} db + \frac{b}{p} df - \frac{bf}{p^2} dp$$

$$dy = -\frac{b \cdot f}{p^2} dp, \quad p^2 = \left(\frac{b \cdot f}{y} \right)^2$$

$$dy = -\frac{y \cdot y}{b \cdot f} dp$$

$$m_y = \pm \frac{y \cdot y}{b \cdot f} m_P$$

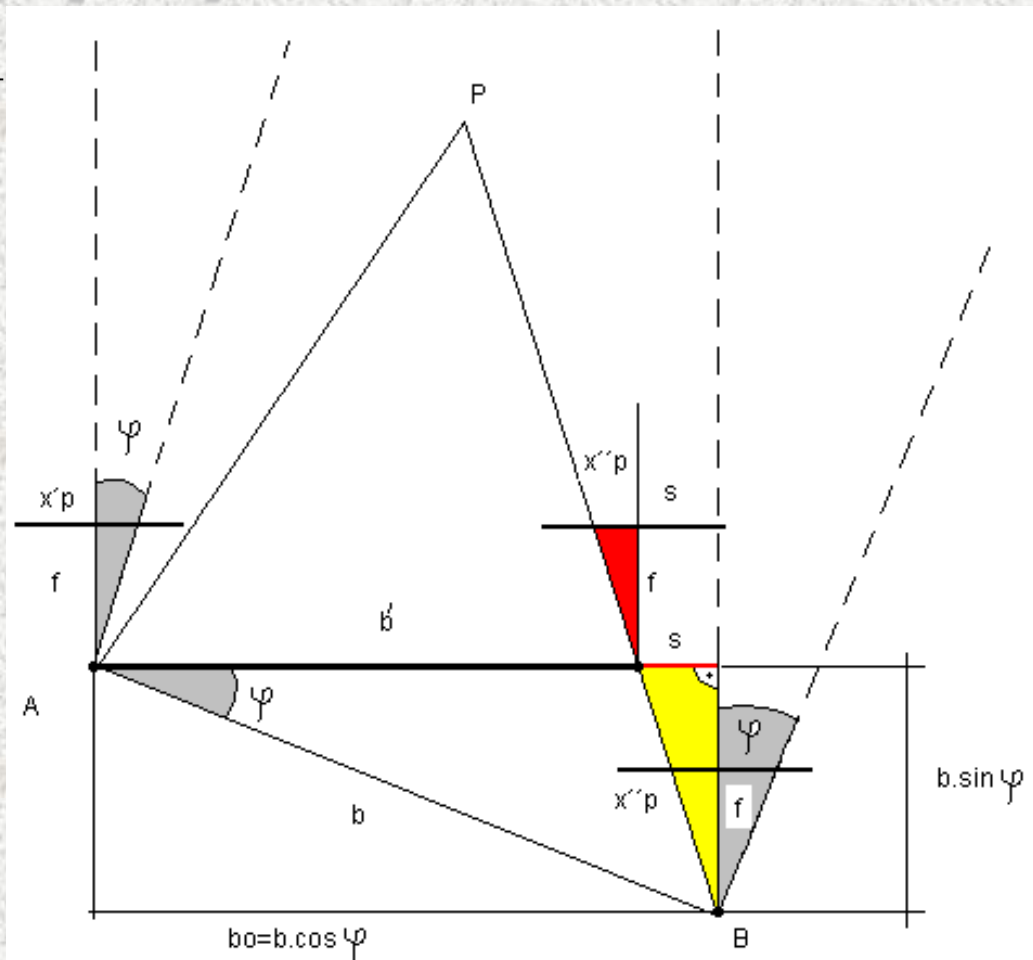


Stočený případ

$$b' = b \cdot \left(\cos \varphi \pm \frac{x_p''}{f} \cdot \sin \varphi \right) \quad \frac{s}{b \cdot \sin \varphi} = \frac{x_p''}{f}$$

$$b' = b_x \pm b_y \cdot \frac{x_p''}{f}$$

$$x = \frac{b' \cdot x'}{p} \quad y = \frac{b' \cdot f}{p} \quad z = \frac{b' \cdot z'}{p}$$



skloněný případ

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \mathbf{R}_\omega \cdot \begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_\omega = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix}$$



Fotogrammetrická základna

$$y = \frac{b \cdot f}{p} \quad dy = -\frac{y \cdot y}{b \cdot f} dp$$

$$b = -\frac{y}{dy} \cdot \frac{y}{f} dp$$

kde dosadíme $dp = 0.01\text{mm}$ = běžná střední chyba měření horizontální paralaxy, dy/y je požadovaná přesnost vyhodnocení jako relativní chyba (např. 1/1000), f je konstanta komory;

$p_{\max} = 40\text{-}50\text{mm}$

$$b_{\min} = y_{\max} \cdot \frac{y}{dy} \cdot \frac{dp}{f} \quad b_{\min} = y_{\max} \cdot \frac{10\text{mm}}{f[\text{mm}]}$$

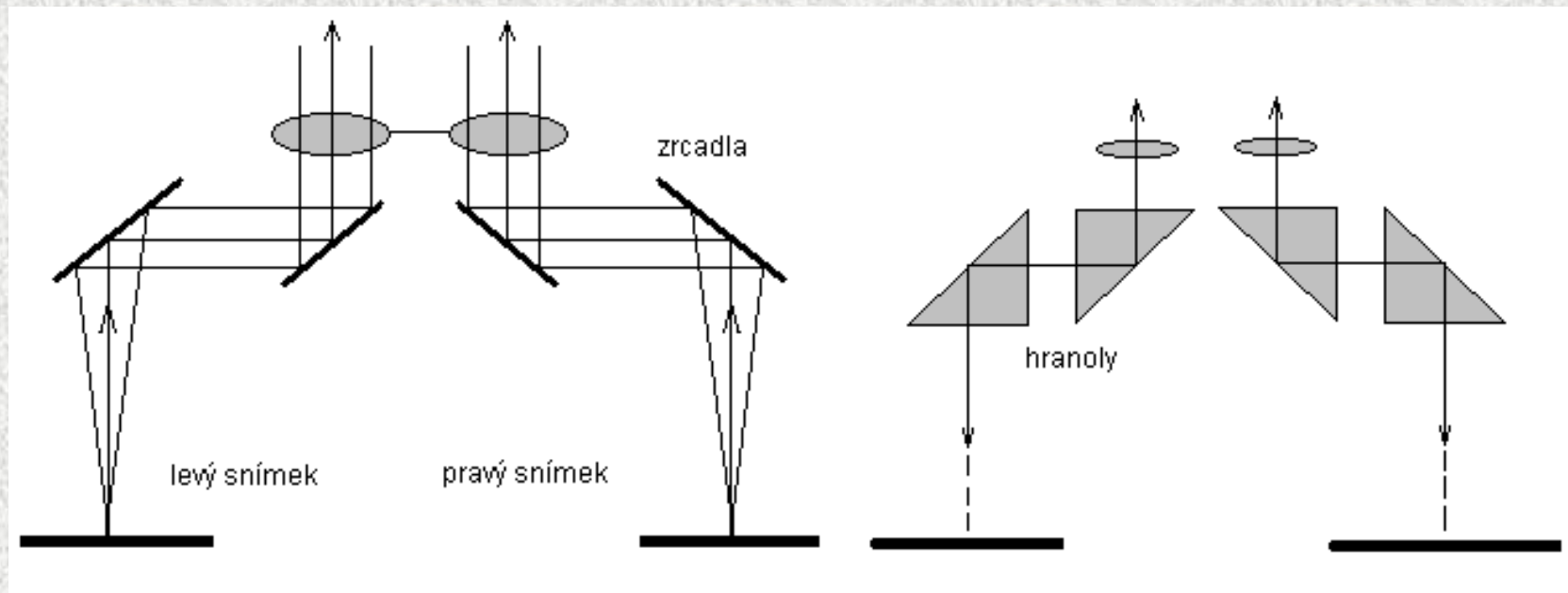
$$b_{\max} = y_{\min} \cdot \frac{p_{\max}}{f}$$

fotogrammetrická základna

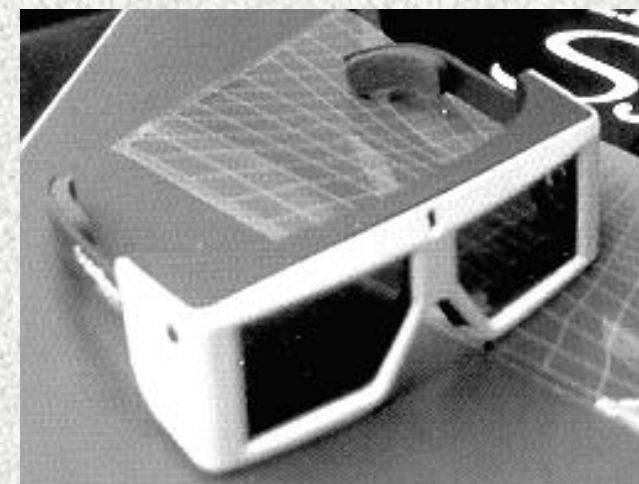


<i>Přesnost $dy/y = 1/1000$</i>	<i>f [mm]</i>	<i>střední b</i>	<i>min. b</i>	<i>max. b</i>
PhoTheo 13x18	195	$b_{\text{stř}} = 1/10 y_{\text{stř}}$	$b_{\text{min}} = 1/20 y_{\text{max}}$	$b_{\text{max}} = (1/4 - 1/5) y_{\text{min}}$
RolleiMetric 6x6	40	1/2	1/4	4/5 - 1/1
RolleiMetric 6x6	80	1/3	1/8	2/3
UMK 10/1318	100	1/5	1/10	1/2
Nikon 100	17	1	1/2	2 - 3
Canon 20D	10	2	1	4 - 5
Canon 20D	22	1	1/2	2 - 3
Nikon 100	35	9/10	1/3	1-3/2
Canon 20D	85	1/3	1/9	1/2

Stereoskopické pozorování



Pomůcky



nová řešení



nová řešení



Zachycení obrazu

Vznik obrazu

Fotogrammetrie se zabývá získáváním měřických informací ze obrazu – ten je zachycen pomocí **detektoru**

$$M = S^E$$

kde E je počet prvků, S je počet možných stavů jednoho prvku a M je celkový počet stavů (počet kombinací). Jednotka informace je definována jako množství informace potřebné k zapsání dvou různých stavů jednoho prvku:

$$\log_2 M = E \cdot \log_2 S$$

kde $\log_2 M$ = množství informace [bit], (1byte=8bitů). Základní jednotkou digitálního obrazu je **pixel** (z anglického *picture element*). **Princip : zachycení záření**

$$E = h \cdot f$$

Detektory:

-tepelné

-integrální

$$Q = \Phi \cdot t$$

-fotonové

-kvantitativní

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}$$

kde Q je zářivá energie, Φ je zářivý tok a t je čas

Vznik obrazu

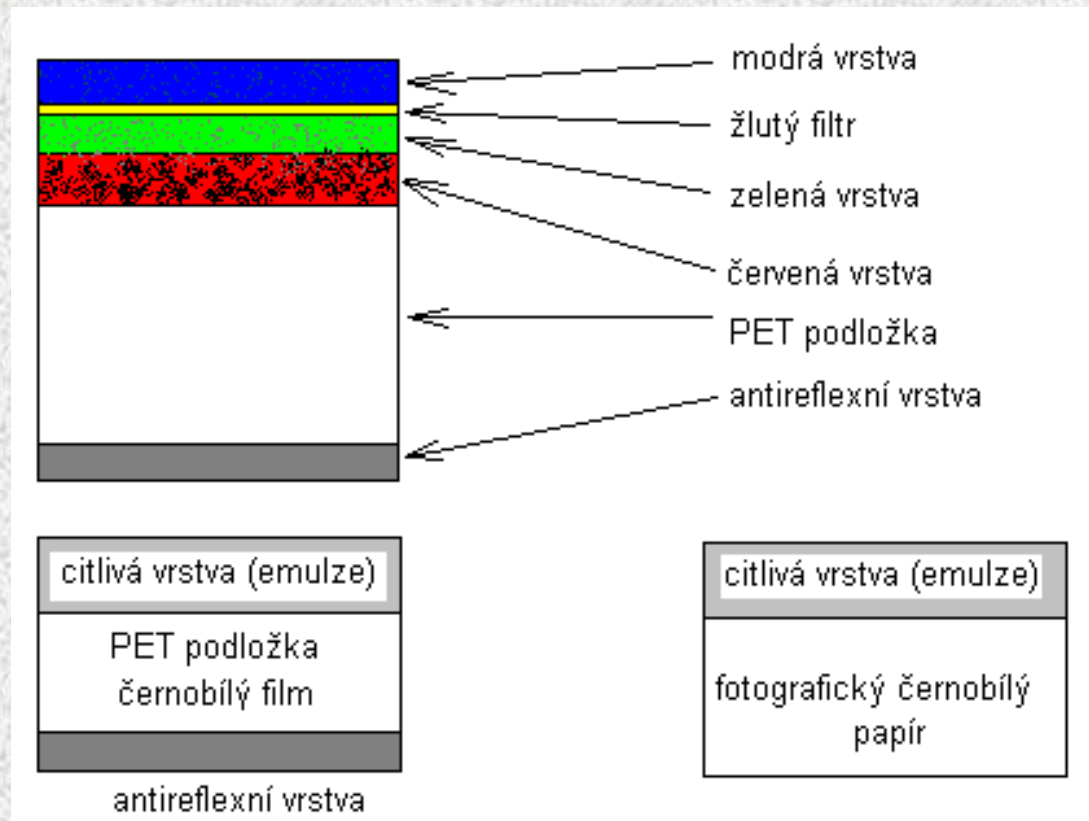
Fotografický materiál

Všeobecně lze fotografický materiál rozdělit na:

pozitivní materiál, negativní materiál a inverzní (diapozitivní) materiál.

Dále se fotografický materiál dělí na:

- barevný
- černobílý (panchromatický, ortochromatický)
- inframateriál
- spektrozónální



Vznik obrazu

- všeobecná citlivost $100ASA = 21DIN$
 $200ASA = 24DIN$
 $400ASA = 27DIN$

- gradace

- udává závislost mezi množstvím světla a stupněm černání citlivé vrstvy, neboli rychlost černání při konstantním osvětlení. Závislost černání na expozici udává *senzitivometrická křivka*.

- rozlišovací schopnost

$$RS_{max} = \frac{1000 \cdot A}{2.4 \cdot \lambda \cdot f} \quad [\text{'}/\text{mm}]$$

f/A	2.8	8.0	32.0
RS_{max} (čar/mm)	298	83	26

senzitometrická křivka

$$T = \frac{\Phi_{\text{prostup}}}{\Phi_{\text{dopad}}}$$

kde Φ je světelný tok, T je propustnost, $1/T$ se nazývá transparence

$$D = \log\left(\frac{1}{T}\right) = -\log(T)$$

D je denzita (optická hustota, stupeň černání).

$$E = \frac{\Phi}{S}$$

E je intenzita osvětlení [lux], S je osvětlená plocha.

$$H = E \cdot t$$

H je expozice a t je čas (tzv. expoziční čas).

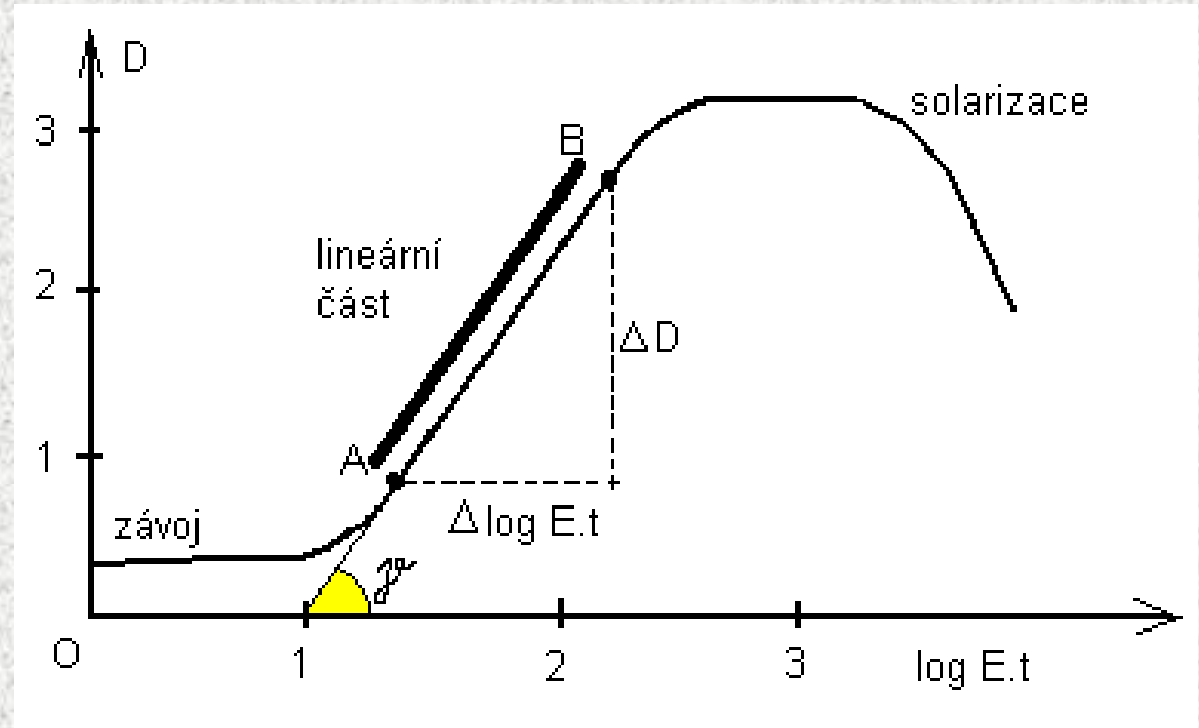
$$G = \frac{\Delta D}{\Delta \log(H)}$$

Vznik obrazu

$$G = \operatorname{tg}(\gamma)$$

gradace (strmost) G

Gradace je gradient lineární části senzimetrické křivky

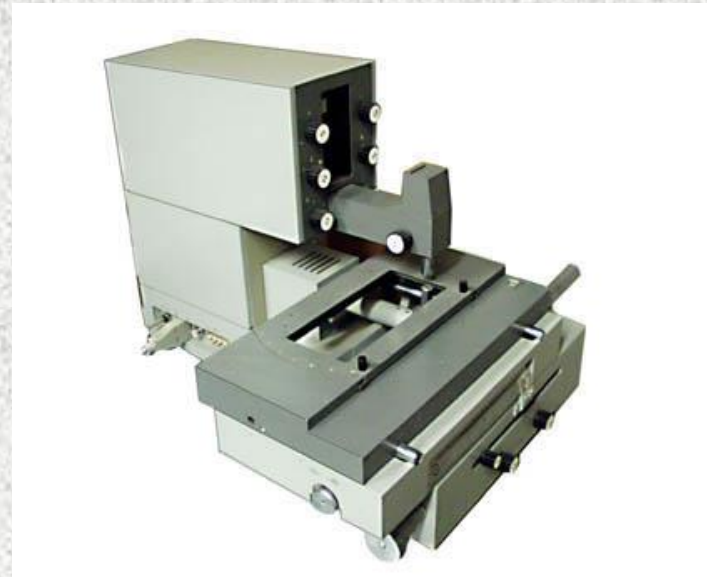


$G < 1 \dots (\gamma < 45^\circ) \dots$ měkce pracující materiál

$G = 1 \dots (\gamma = 45^\circ) \dots$ normálně pracující materiál

$G > 1 \dots (\gamma > 45^\circ) \dots$ strmě pracující materiál (tvrdý)

Vznik obrazu



Denzitometr Meodenzi TRD01-Meopta (vlevo), Zeiss Jena MD100 (vpravo)

Vznik obrazu

Zpracování fotografických materiálů

Běžný černobílý fotografický materiál se zpracovává klasickým postupem:

- a) exponování materiálu
- b) vyvolávání materiálu ; filmové pásy v tancích, desky založené v nosičích ve vanách; (používá se vývojka dle druhu 5-15 minut)
- c) přerušovací lázeň (běžně obyčejně voda, opláchnutí)
- d) ustálení (kyselý ustalovač, 5-10 minut)
- e) praní (tekoucí voda, 10-20 minut)
- f) sušení

Vznik digitálního obrazu

Digitální obraz je obraz v číslicové podobě (vyjádřený čísly). Vzniká buď primárně digitálními snímacími zařízeními nebo skenováním analogových snímků. Digitální obraz se skládá z jednotlivých pixelů,

(z anglického *picture elements*) nabývajících určitých hodnot, která nejsou libovolné (dáno technickými možnostmi počítače a kódováním).

$$P[i, j] = f(i, j)$$

$f(i, j)$	$f(i, j+1)$	$f(i, j+2)$	$f(i, j+3)$	$f(i, j+4)$
$f(i+1, j)$	$f(i+1, j+1)$	$f(i+1, j+2)$	$f(i+1, j+3)$	$f(i+1, j+4)$
$f(i+2, j)$	$f(i+2, j+1)$	$f(i+2, j+2)$	$f(i+2, j+3)$	$f(i+2, j+4)$
.....				
.....				$f(m, n)$

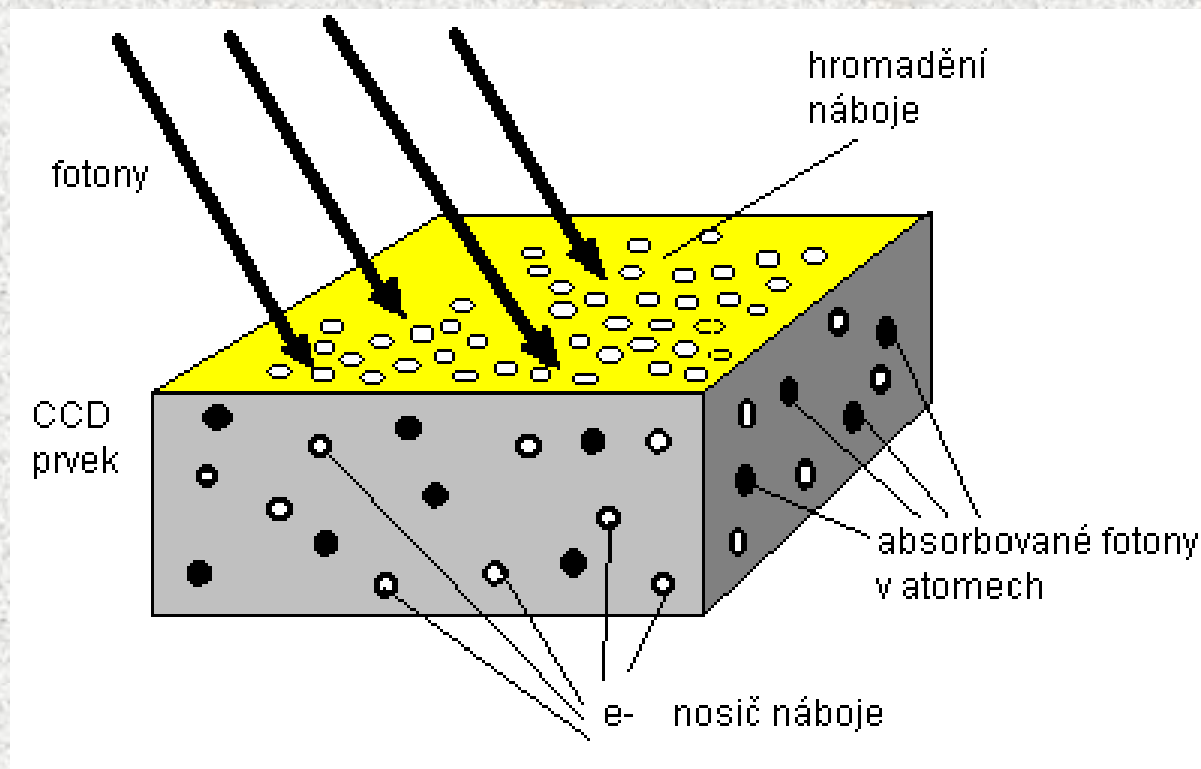
$$M = m \cdot n \cdot e \text{ [byte]}$$

Vznik obrazu

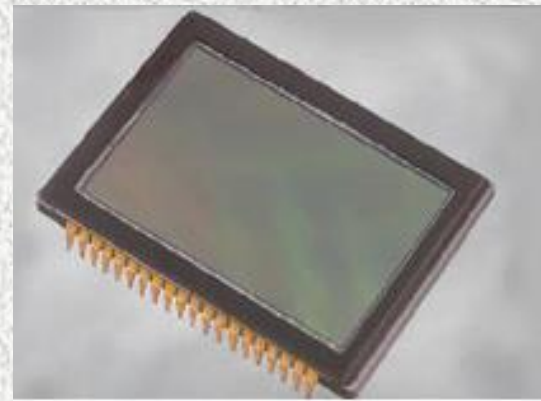
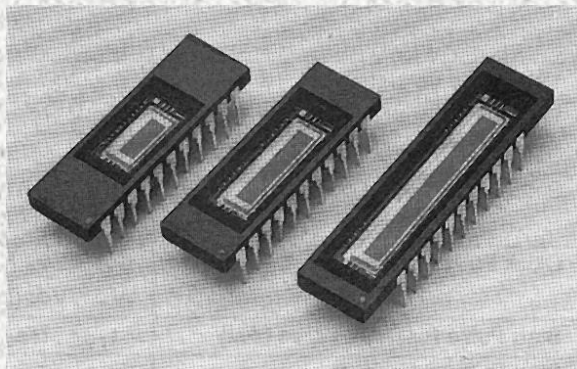
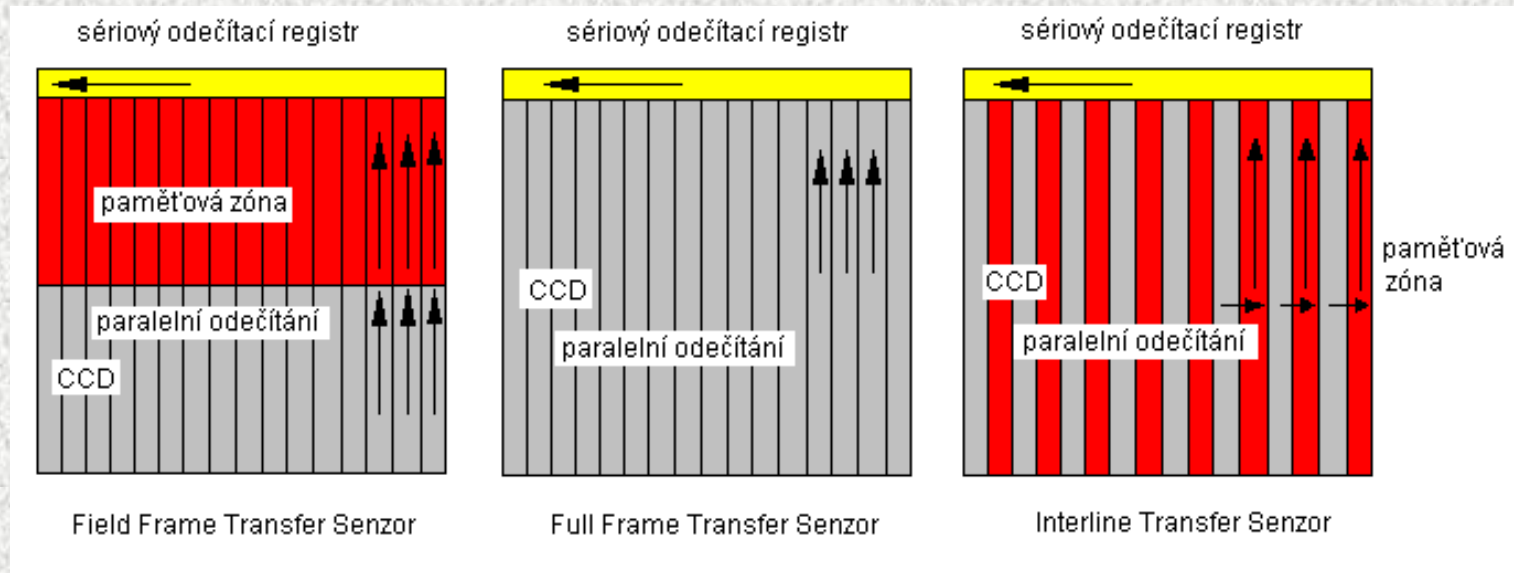
Nejběžnějším typem detektoru je prvek CCD. Název je odvozen od pojmenování prvku v angličtině „*Charge Coupled Device*“.

CMOS (*Complementary Metal Oxid Semiconductor*) je elektronická součástka na bázi tranzistoru. Oproti CCD je výrobně jednodušší, menší, až o 80% levnější, má menší spotřebu oproti CCD (pouhé 1%!).

Fotočlánek - princip jeho funkce je obecně stejný s detektory CCD, liší se zejména velikostí



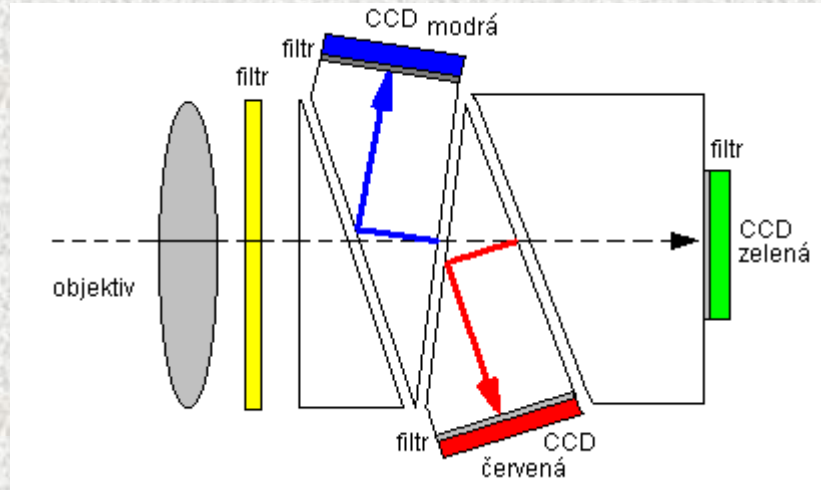
Vznik obrazu



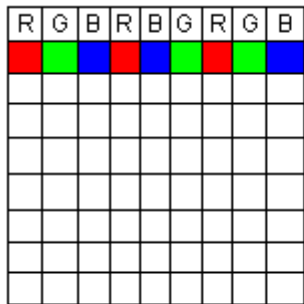
Vznik barevného obrazu

Tříprůchodová komora (*tree pass camera*)

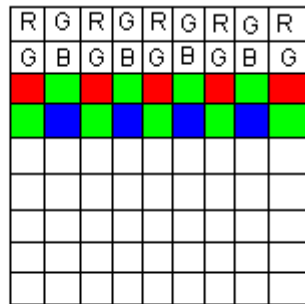
Třísenzorová komora



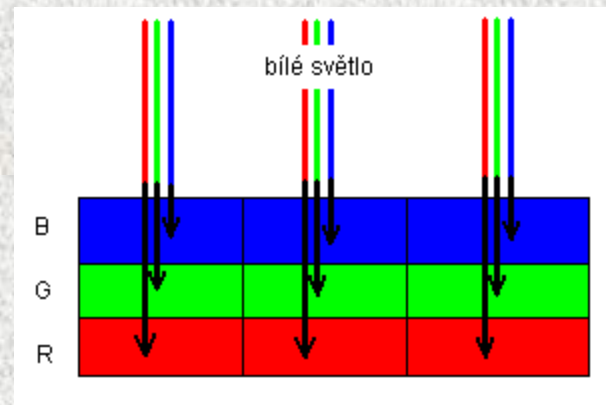
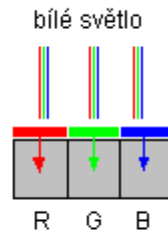
Jediný senzor (*one shot camera*)



RGB pásová maska

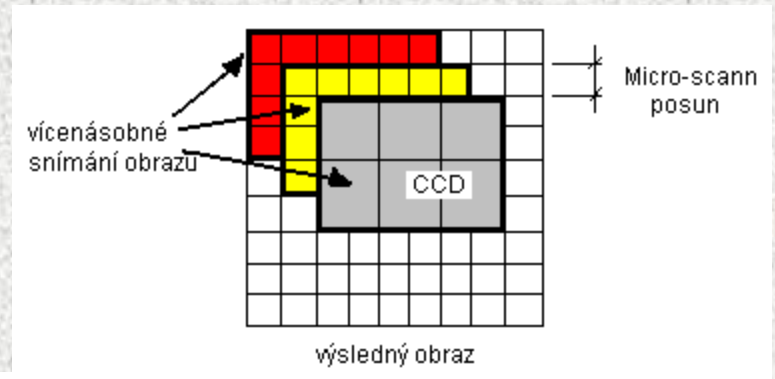


RGBG mozaiková maska

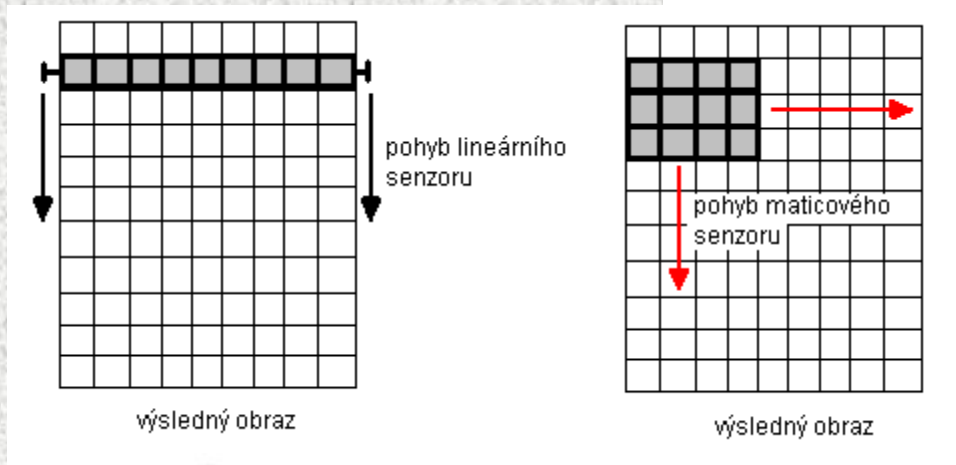


Vznik obrazu

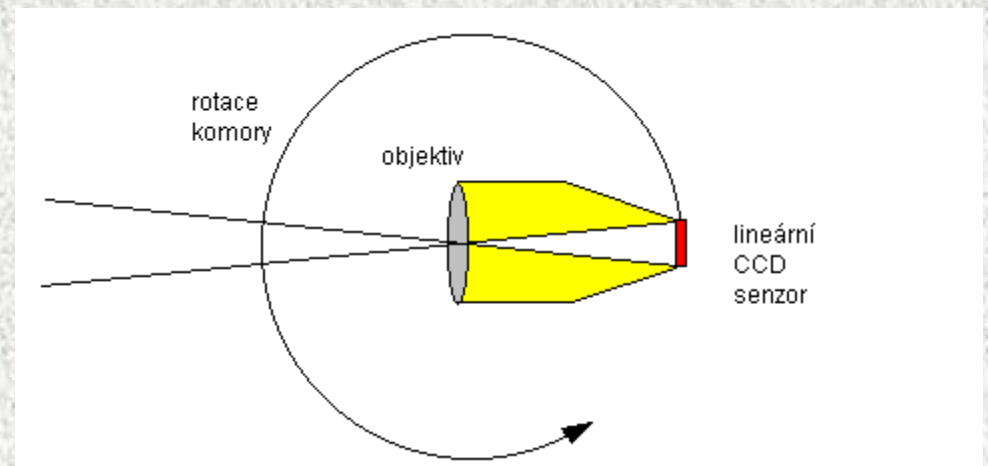
Micro-scanning



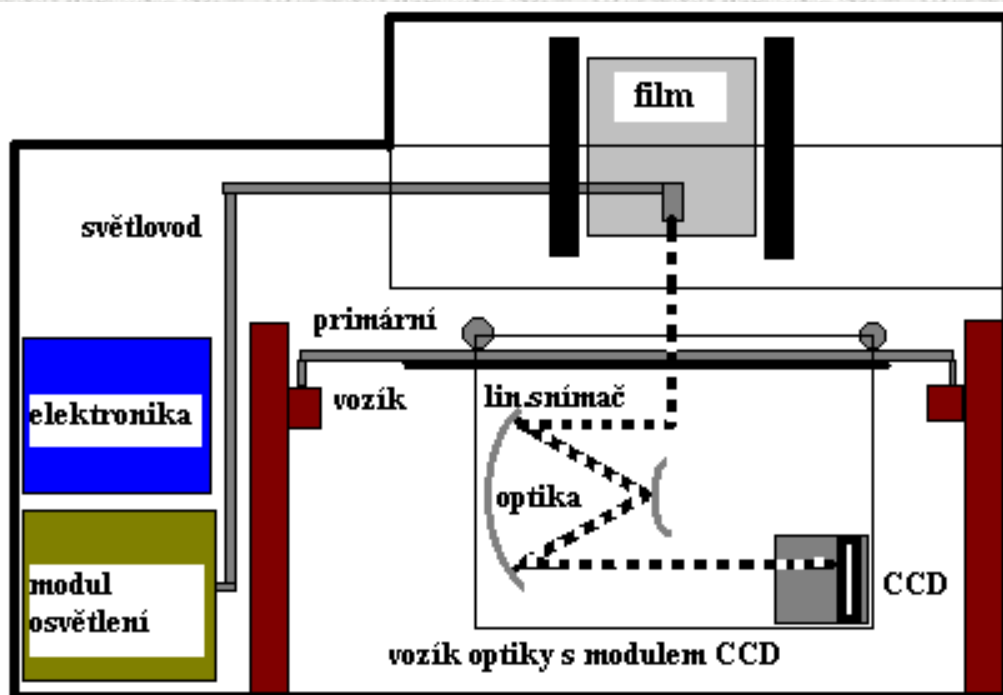
Macro-scanning



Panoramatické komory



Druhotný vznik digitálního obrazu: skenováním

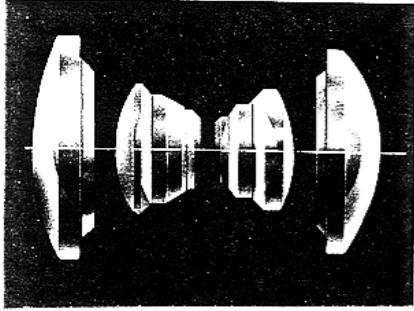


Skener PhotoScan2001

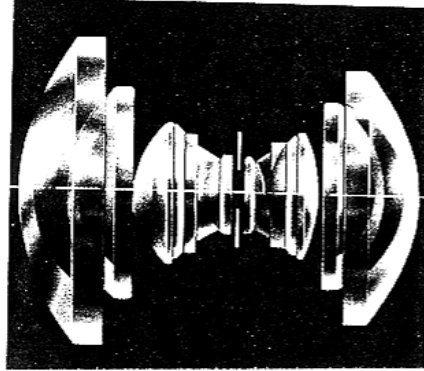
Fotogrammetrické komory

Fotogrammetrické pozemní komory

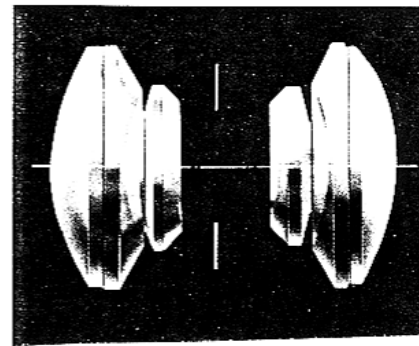
LAMEGON 8/100 B



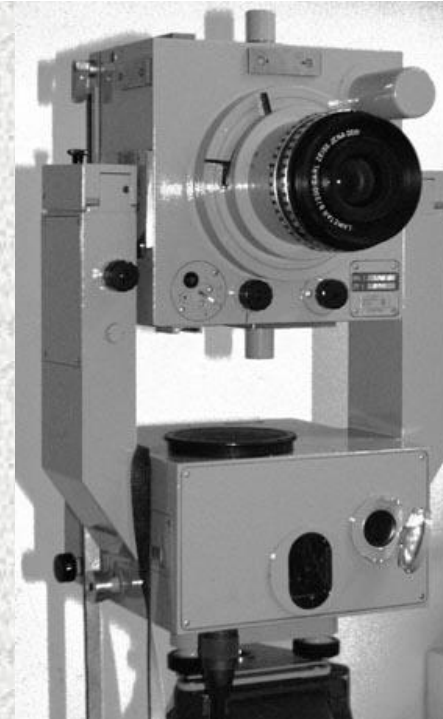
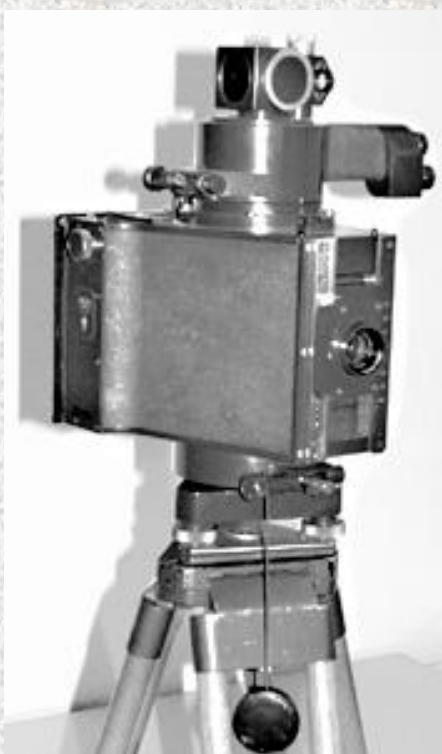
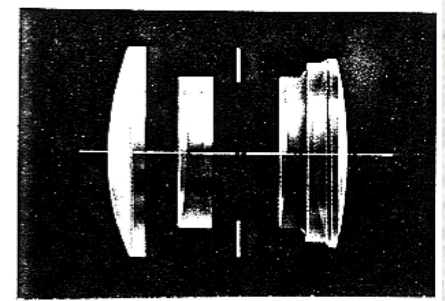
SUPERLAMEGON PI 5,6/64



LAMETAR 8/200



LAMETAR 11/300



Pozemní fotogrammetrické komory



← **Těžké komory UMK**
(skleněné desky nebo planfil 13x18cm)

Réseau komora RolleiMetric 6006
(svitkový film, 6x6cm) →

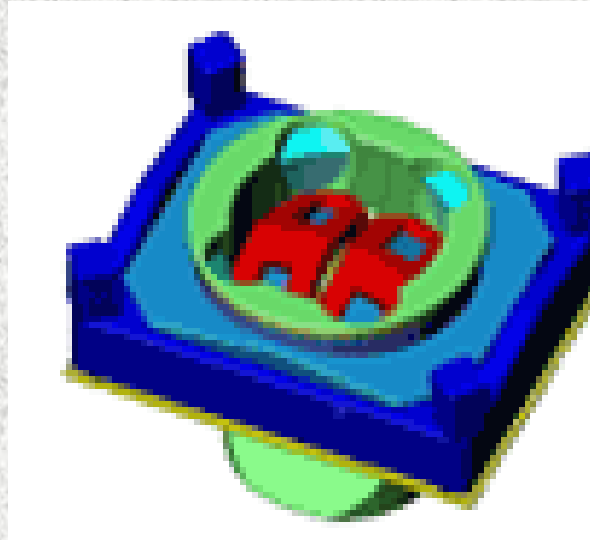
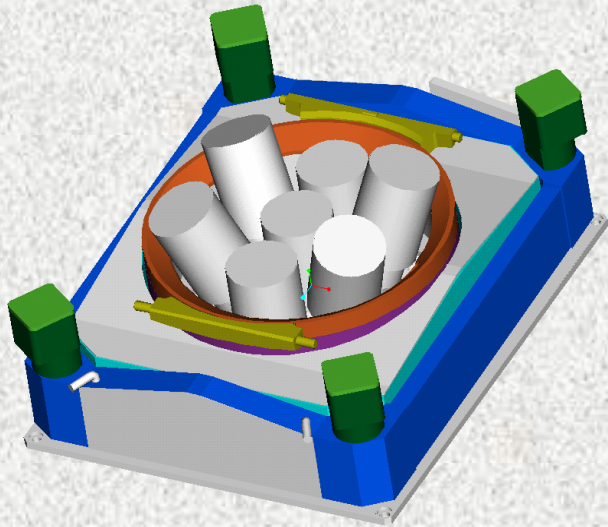


Fotogrammetrické komory

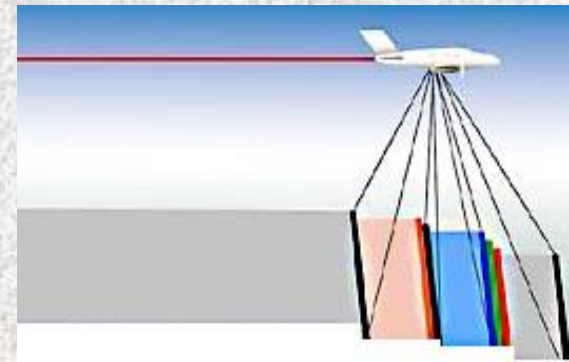
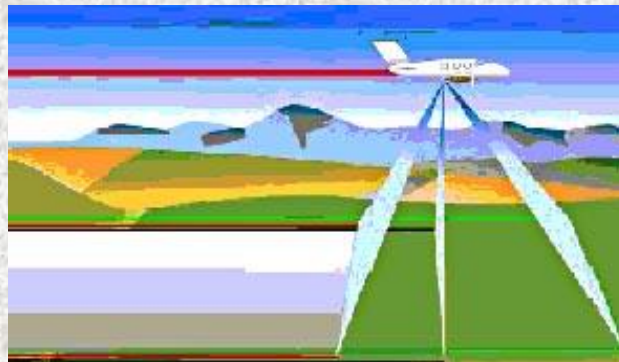


*Komora Leica RC 30
Komora Zeiss RMK-TOP a gyrostabilizovaná plošina TAS,
Komora LMK (Zeiss Jena)*

digitální letecké komory



Pohled na komoru DMC (nahore), původní schéma gyrostabilizované sensorové části (vlevo), současné schéma (vpravo)

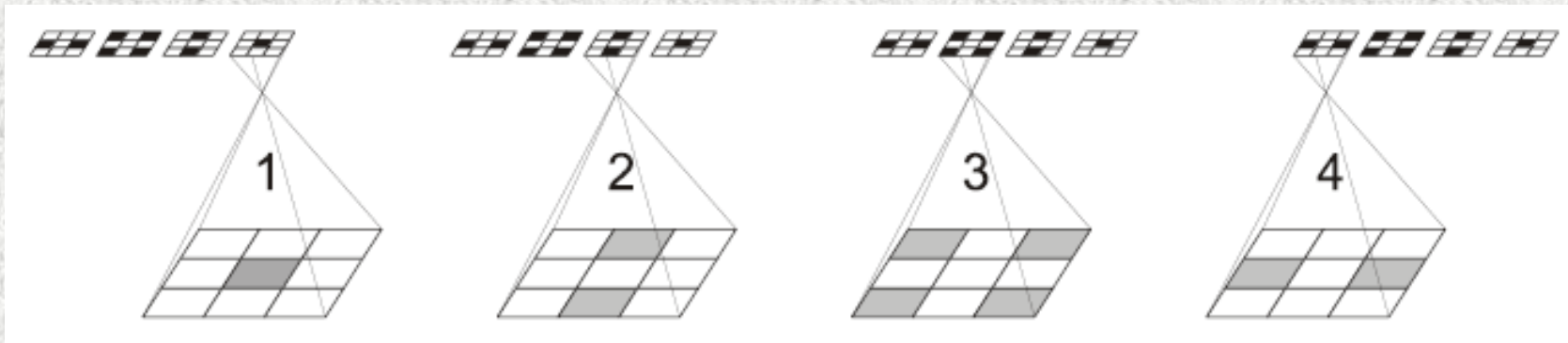


Hlava senzoru ADS40 , ADS40, princip skenování povrchu

digitální letecké komory



Komora UltraCam D



Profesionální digitální fotoaparáty



*kamery Canon
EOS a Sigma,
cca r.2003,
3.1MPix*

➤ *Současné možnosti rozlišení 10-30MPix*



**Canon EOS 5D Mark IV
r.2020, 30.4MPix**

Letecké komory – pomocná zařízení

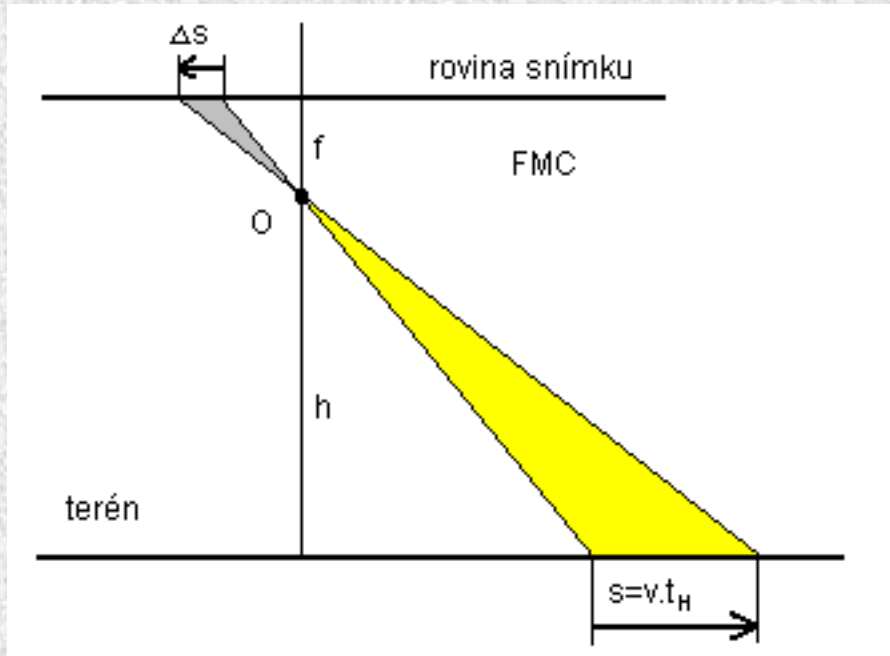
Kompenzace pohybu letadla - eliminace smazu zařízení typu **FMC** (*Film Motion Correction*) : pohyb filmu v okamžiku expozice, vyšší ostrost záznamu

INS=IMU/GNSS (Inertial Navigation System, *Inertial Measurement Unit*) zařízení umožňuje v čase určovat prostorovou orientaci a polohu letecké komory. Přímou lze určit hodnoty prvků vnější orientace a zrychlení



Další: výškoměr, regulátor překrytu aj.

Vznik smazu



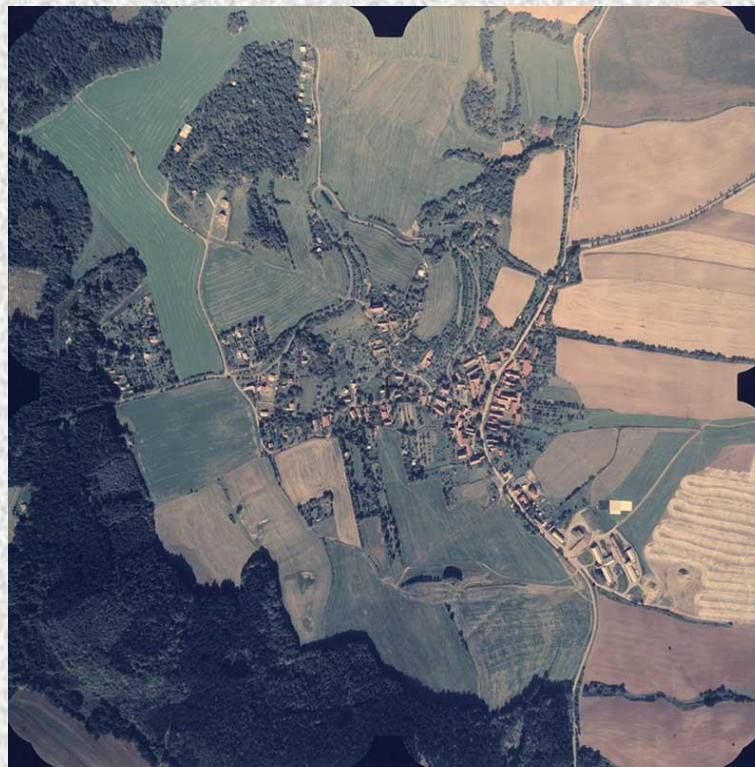
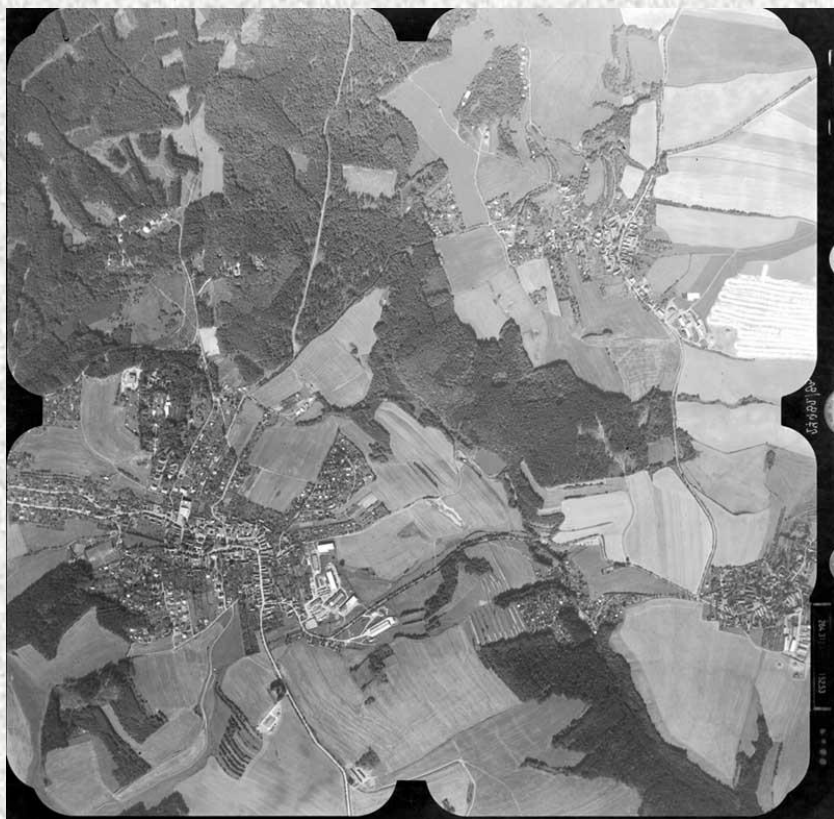
$$m_S = \frac{h}{f}, \quad \Delta s = \frac{t_H \cdot v}{m_S}$$

Vznik smazu; Příklad: $m_S = 10\,000$, $t_H = 0.01\text{s}$, $v = 360\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$: $\Delta s = 1/10000\text{m} = 100\mu\text{m}$, tj. je nutný kompenzační posun rychlostí 10mm/s.

Fotogrammetrické záznamy klasické



rámové značky



družicová fotogrammetrie

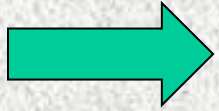


*Ikonos 1, r.1999 (1m PAN, 4m MSS);
dnešní civilní družice 0,35-0,5m PAN*

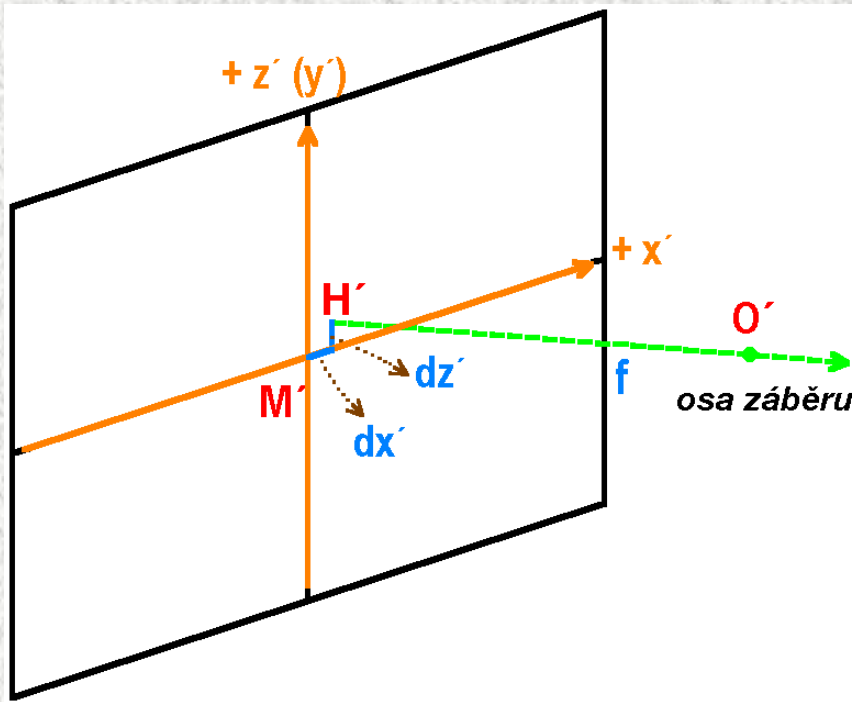
Kalibrace a justáž komor



Měřický snímek



**Známé prvky vnitřní orientace,
známá poloha rámových značek**



**Poloha hlavního
snímkového bodu H'**

- souřadnice dx' , dy' (dz')
vzhledem k M' (na 0,01 mm)

Konstanta komory f

- (na 0.01mm)

Znalost průběhu distorze

- (je-li významná, tj. větší než
0.01mm)

Kalibrace komor

Hlavní kroky justáže a kontroly pro starší klasické analogové pozemní komory jsou:

- kontrola f , dx' , dz' – výpočtem či v optické laboratoři
 - kontrola kolmosti vertikální osy k ose libel (zanivelujeme místo, kam míří osa a střed promítání)
 - orientační zařízení - záměrná osa dalekohledu má být v jedné rovině s osou záběru fotokomory; kontrola se provede cílením na určitý bod a jeho následným fotografováním; pro proměření jeho polohy na snímku by měl být zobrazen v H' (pozor na excentricitu!)
 - svislá poloha rámu (fotografování dvou olovnic)
 - přítlačné zařízení - kontroluje se, zda se deska nebo film skutečně přesně přitlačí ke značkovému rámu; v případě nepřilnutí jsou měřitelné rozdíly v poloze rámových značek (desetiny mm)
 - rovina snímku má být rovnoběžná s rovinou rámu (má platit $\omega=0$), pořizuje se fotografie dvou olovnic a na snímcích se měří vzdálenosti mezi závěsy nahoře a dole
 - rektifikace libel (běžný způsob viz geodézie)
 - záměrné zařízení - jako běžný teodolit (viz geodézie)
- U digitálních komor se celá justáž omezuje na zjištění prvků vnitřní orientace výpočtem z kalibračního pole a dále obvykle na odborné čištění komory v servisu (čištění optiky – objektivy jsou často náchylné na průnik prachových částic z důvodu jejich složitosti, čištění senzoru od prachu)**

Metody pro stanovení prvků vnitřní orientace (pvo)

- 1. Laboratorní metody**
- 2. Měřicko-početní určení PVO**

a) určení prvků vnitřní orientace bez vyrovnání

b) metody určení prvků vnitřní orientace s vyrovnáním

- Gruberova metoda
- Hegershoffova metoda
- Baeschlinova metoda

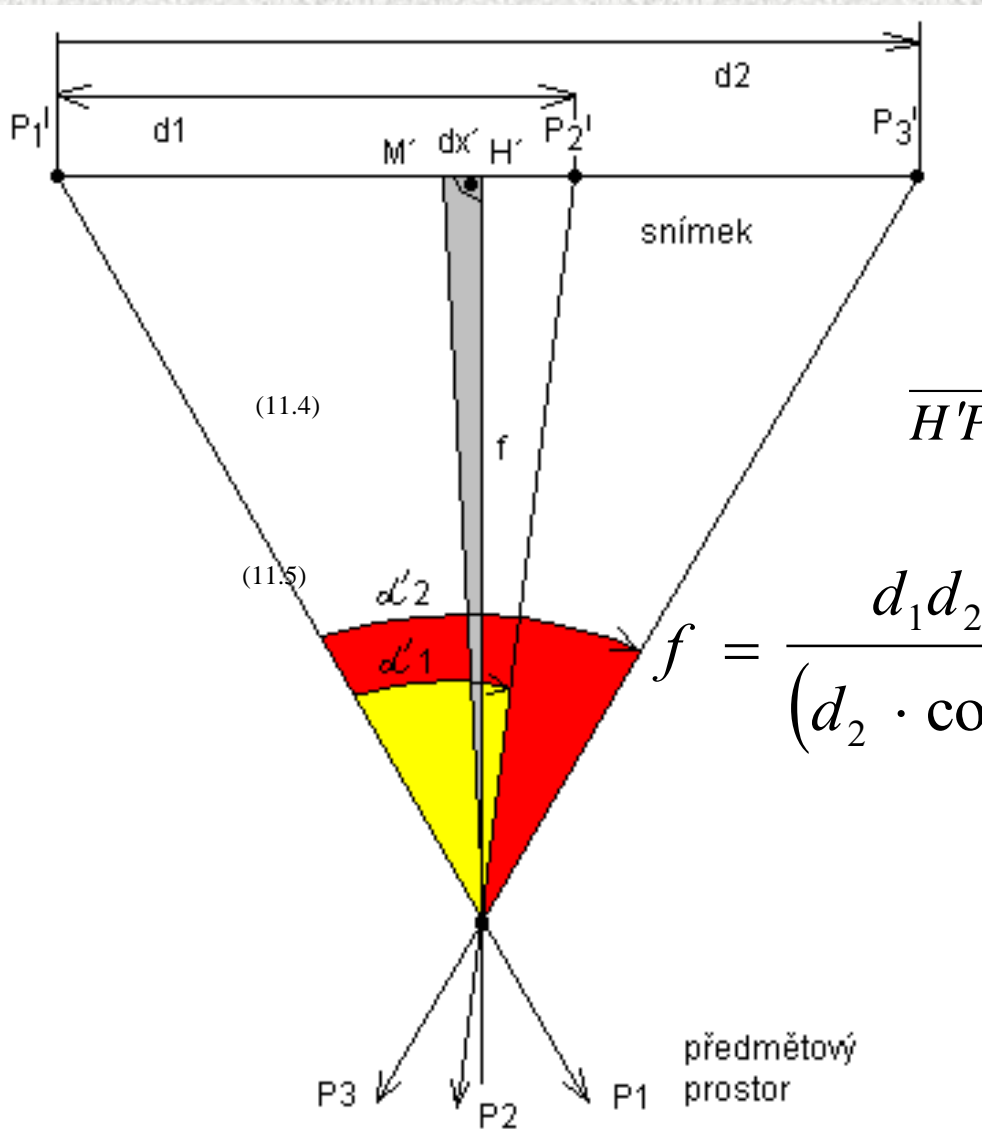
c) současné určení prvků vnitřní orientace i vnější orientace pomocí přímé lineární transformace (*DLT - Direct Linear Transformation*)

d) současné určení prvků vnitřní i vnější orientace při analytických metodách (např. komplexní metoda, viz dále)

Postup při určování prvků vnitřní orientace pro analogové komory

- Pořízení zkušebního snímku
- Zkoušenou komoru, u které jsou rektifikované libely, pečlivě horizontujeme a pořídíme s ní snímek prostoru s dobře identifikovatelnými vzdálenými body, rozloženými nejlépe podél horizontu.
- Zaměření osnovy vodorovných směrů
- Zaměříme osnovu vodorovných směrů na vybrané body (vteřinovým teodolitem). Teodolit se centruje nad středem vstupní pupily zkoušené fotokomory – ten ale není shodný s točnou osou přístroje (tj., teodolit nelze jednoduše zaměnit za měřickou komoru v trojnožce). Stativ s trojnožkou a teodolitem je nutno centrovat nad bodem posunutým ve směru osy záběru o hodnotu excentricity středu vstupní pupily od svislé točné osy fotokomory. U běžně používaných fotokomor jsou hodnoty excentricity známy.
- Měření snímkových souřadnic
- Pro vybrané body se změří na komparátoru snímkové souřadnice (odečítají se podle typu použitého přístroje alespoň na 0.01 mm).
- Výpočet
- Vlastní výpočet lze provést rychle bez vyrovnání, metody s vyrovnáním se provedou na osobním počítači

Určení prvků vnitřní orientace bez vyrovnání



$$d_1 = x'_2 - x'_1, d_2 = x'_3 - x'_1$$

$$\alpha_1 = \psi_2 - \psi_1, \alpha_2 = \psi_3 - \psi_1$$

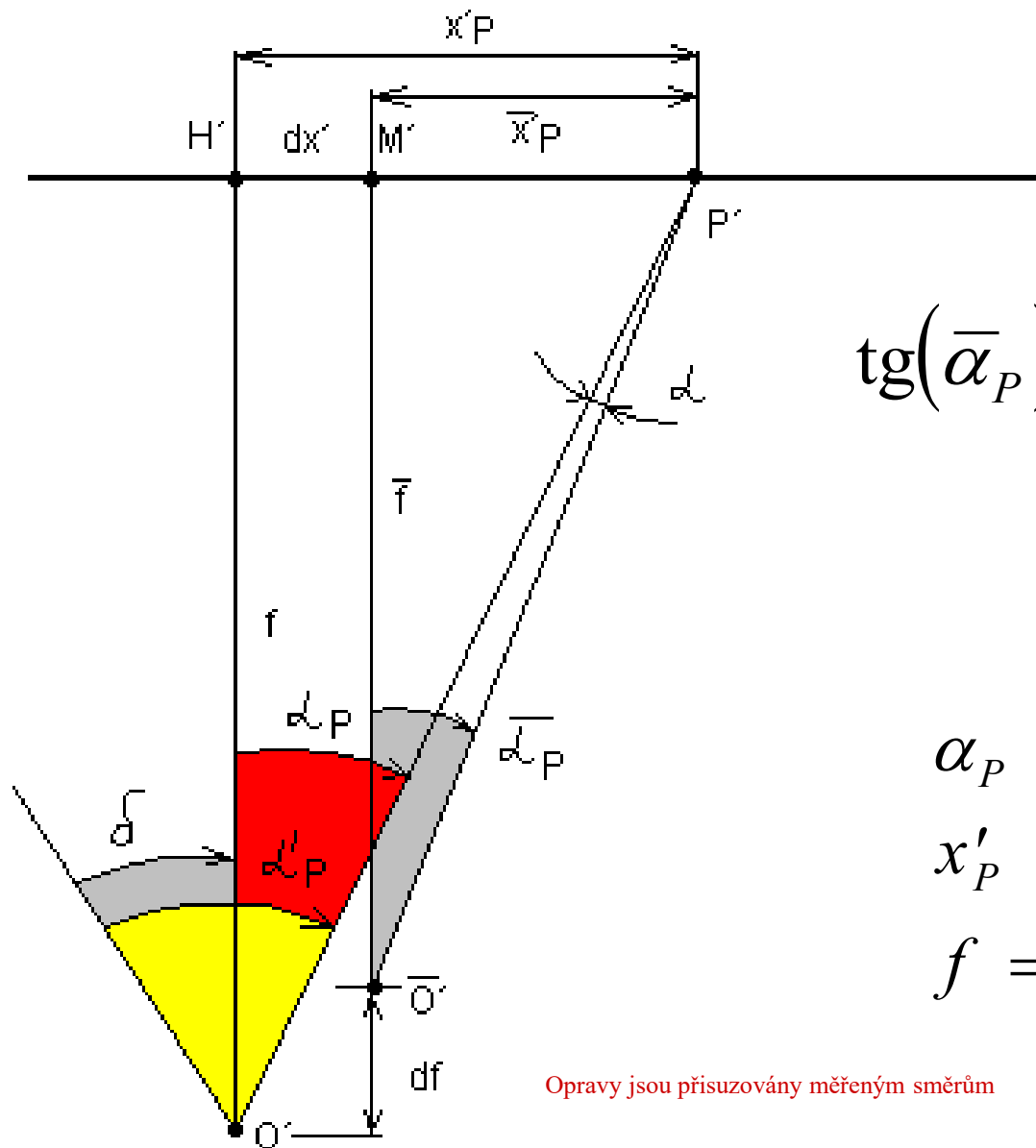
$$\overline{H'P'_1} = f \cdot \frac{d_2 \cdot \cotg \alpha_2 - d_1 \cdot \cotg \alpha_1}{(d_2 - d_1)}, \overline{M'P'_1} = x'_{P_1}$$

$$f = \frac{d_1 d_2 (d_2 - d_1) \cdot (\cotg \alpha_1 - \cotg \alpha_2)}{(d_2 \cdot \cotg \alpha_2 - d_1 \cdot \cotg \alpha_1)^2 + (d_2 - d_1)}$$

$$d'_x = \overline{H'P'_1} - \overline{M'P'_1}$$

Přesné metody početního určení pvo

Gruberova metoda



$$\operatorname{tg}(\bar{\alpha}_P) = \frac{\bar{x}'_P}{\bar{f}}, \quad \operatorname{tg}(\alpha_P) = \frac{x'_P}{f}$$

$$\alpha_P = \alpha'_P - \delta = \bar{\alpha}_P - d\alpha$$

$$x'_P = \bar{x}'_P + dx'$$

$$f = \bar{f} + df$$

Opravy jsou přisuzovány měřeným směrům

Gruberova metoda

$$\operatorname{tg}(\alpha_P) = \operatorname{tg}(\bar{\alpha}_P + d\alpha) = \frac{x'_P}{f} = \frac{\bar{x}'_P + dx'}{\bar{f} + df}$$

$$\operatorname{tg}(\bar{\alpha}_P) + \frac{1}{\cos^2(\bar{\alpha}_P)} d\alpha = \frac{\bar{x}'_P}{\bar{f}} + \frac{1}{\bar{f}} dx' - \frac{\bar{x}'_P}{\bar{f}^2} df$$

$$\frac{1}{\cos^2(\bar{\alpha}_P)} = 1 + \operatorname{tg}^2(\bar{\alpha}_P) = 1 + \frac{\bar{x}'_P{}^2}{\bar{f}^2} = \frac{\bar{f}^2 + \bar{x}'_P{}^2}{\bar{f}^2}$$

$$\frac{\bar{x}'_P}{\bar{f}} + \frac{1}{\cos^2(\bar{\alpha}_P)} d\alpha = \frac{\bar{x}'_P}{\bar{f}} + \frac{1}{\bar{f}} dx' - \frac{\bar{x}'_P}{\bar{f}^2} df \quad \cdot \frac{\bar{f}^2}{(\bar{x}'_P{}^2 + \bar{f}^2)}$$

$$d\alpha = \frac{\bar{f}}{(\bar{x}'_P{}^2 + \bar{f}^2)} dx' - \frac{\bar{x}'_P}{(\bar{x}'_P{}^2 + \bar{f}^2)} df$$

$$\alpha_P = \alpha'_P - \delta = \bar{\alpha}_P - d\alpha$$

$$d\alpha = \alpha'_P - \delta - \bar{\alpha}_P$$

$$v_{\alpha_P} = \delta + \frac{\bar{f}}{(\bar{x}'_P{}^2 + \bar{f}^2)} dx' - \frac{\bar{x}'_P}{(\bar{x}'_P{}^2 + \bar{f}^2)} df + (\bar{\alpha}_P - \alpha'_P)$$

Hugershoffova metoda

přisuzuje opravy měřeným snímkovým souřadnicím:

$$\operatorname{tg}(\bar{\alpha}_P - \delta) = \frac{\bar{x}'_P + v_{x'} + dx'}{\bar{f} + df}$$

$$\operatorname{tg}(\alpha'_P) - \frac{1}{\cos^2(\alpha'_P)} \delta = \frac{\bar{x}'_P}{\bar{f}} + \frac{1}{\bar{f}} (v_{x'} + dx') - \frac{\bar{x}'_P}{\bar{f}^2} df$$

dále platí:

$$\operatorname{tg}(\bar{\alpha}_P) = \frac{\bar{x}'_P}{\bar{f}} \quad \operatorname{tg}(\alpha'_P) - \operatorname{tg}(\bar{\alpha}_P) \cong \frac{1}{\cos(\bar{\alpha}_P)} (\alpha'_P - \bar{\alpha}_P) \quad \frac{1}{\cos^2(\alpha'_P)} \cong \frac{1}{\cos^2(\bar{\alpha}_P)}$$

$$(\alpha'_P - \bar{\alpha}_P - \delta) \frac{1}{\cos^2(\bar{\alpha}_P)} = \frac{1}{\bar{f}} (v_{x'} + dx') - \frac{\bar{x}'_P}{\bar{f}^2} df$$

$$(\alpha'_P - \bar{\alpha}_P - \delta) = \frac{\bar{f}}{\bar{f}^2 + \bar{x}'^2_P} \cdot v_{x'} + \frac{\bar{f}}{\bar{f}^2 + \bar{x}'^2_P} \cdot dx' - \frac{\bar{x}'_P}{\bar{f}^2 + \bar{x}'^2_P} df$$

$$v_{x'} = -dx' + \frac{\bar{x}'_P}{\bar{f}} df - \frac{\bar{f}^2 + \bar{x}'^2_P}{\bar{f}} \cdot \delta - \frac{\bar{f}^2 + \bar{x}'^2_P}{\bar{f}} (\alpha'_P - \bar{\alpha}_P)$$

Direktní lineární transformace (DLT)

$$x' = x'_0 - f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$z' = z'_0 - f \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$x' = \frac{\hat{a}_1 X + \hat{a}_2 Y + \hat{a}_3 Z + \hat{a}_4}{\hat{c}_1 X + \hat{c}_2 Y + \hat{c}_3 Z + \hat{c}_4}, \hat{a}_1 = x'_0 r_{13} - f \cdot r_{11}, \hat{a}_2 = x'_0 r_{23} - f \cdot r_{21}, \hat{a}_3 = \dots$$

$$z' = \frac{\hat{b}_1 X + \hat{b}_2 Y + \hat{b}_3 Z + \hat{b}_4}{\hat{c}_1 X + \hat{c}_2 Y + \hat{c}_3 Z + \hat{c}_4}$$

$$x' = \frac{a_1 X + a_2 Y + a_3 Z + a_4}{c_1 X + c_2 Y + c_3 Z + 1}$$

$$z' = \frac{b_1 X + b_2 Y + b_3 Z + b_4}{c_1 X + c_2 Y + c_3 Z + 1}$$

$$f_x = \sqrt{((a_1^2 + a_2^2 + a_3^2)d^2 - x_0'^2)}$$

$$f_z = \sqrt{((b_1^2 + b_2^2 + b_3^2)d^2 - z_0'^2)}$$

$$d^2 = \frac{1}{c_1^2 + c_2^2 + c_3^2}$$

$$x'_0 = dx'_0 = (a_1 c_1 + a_2 c_2 + a_3 c_3) \cdot d^2$$

$$z'_0 = dz'_0 = (b_1 c_1 + b_2 c_2 + b_3 c_3) \cdot d^2$$

$$f = \frac{f_x + f_z}{2}$$

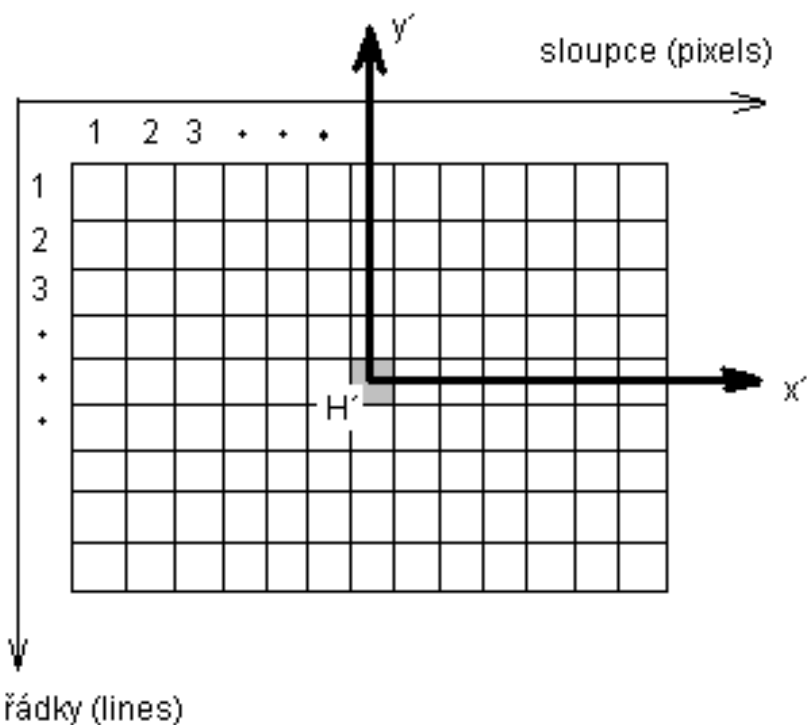
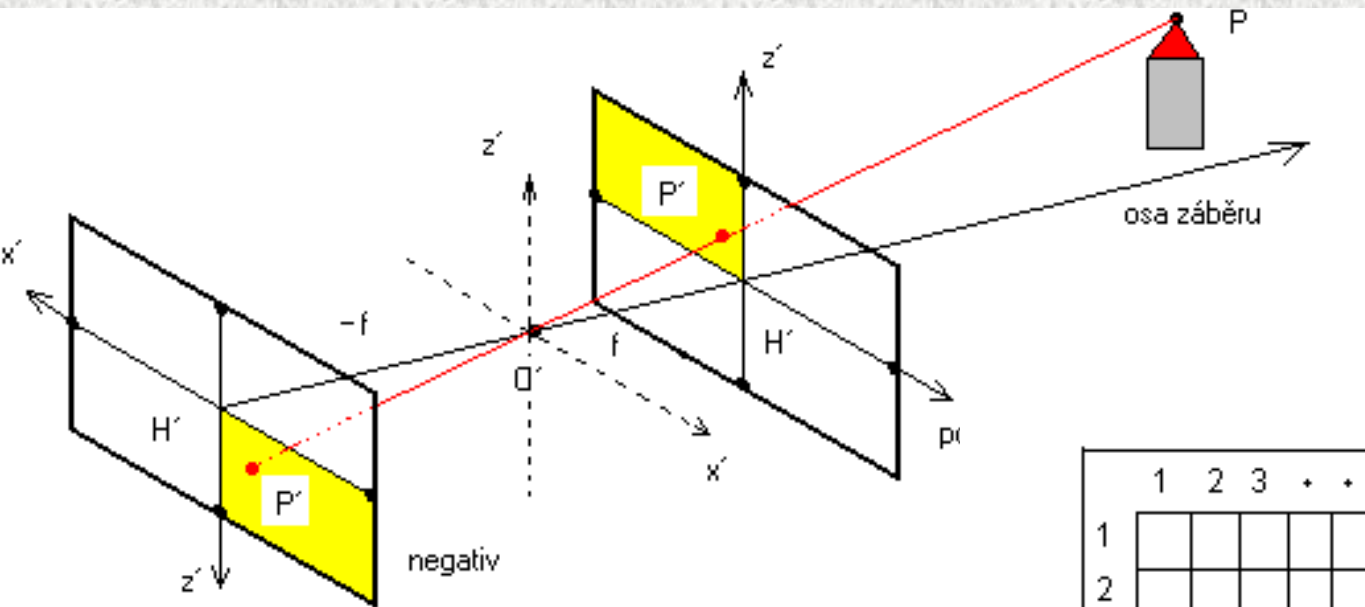
$$v_{x'} = a_1 X + a_2 Y + a_3 Z + a_4 - c_1 X x' - c_2 Y x' - c_3 Z x' - x'$$

$$v_{z'} = b_1 X + b_2 Y + b_3 Z + b_4 - c_1 X z' - c_2 Y z' - c_3 Z z' - z'$$

Digitální snímek



➔ Souřadnice jsou v pixelech (sloupce, řádky)

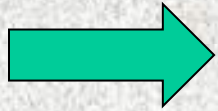


➔ Místo rámových značek: rohové pixely



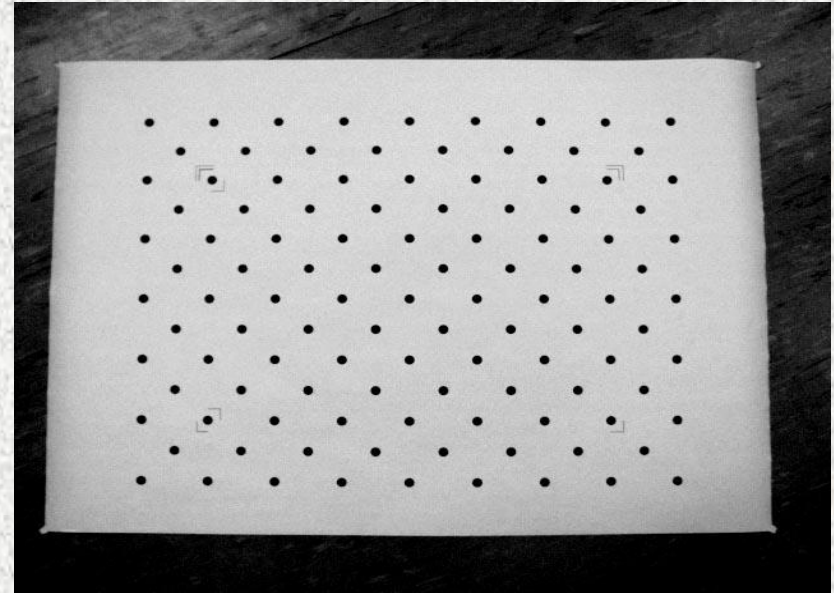
Kalibrace komory

Pokud neznáme prvky vnitřní orientace, je třeba je měřením vypočítat



Kalibrační metody

nejběžnější kalibrace pomocí kalibračního pole
nebo ve specializované optické laboratoři



letecká fotogrammetrie

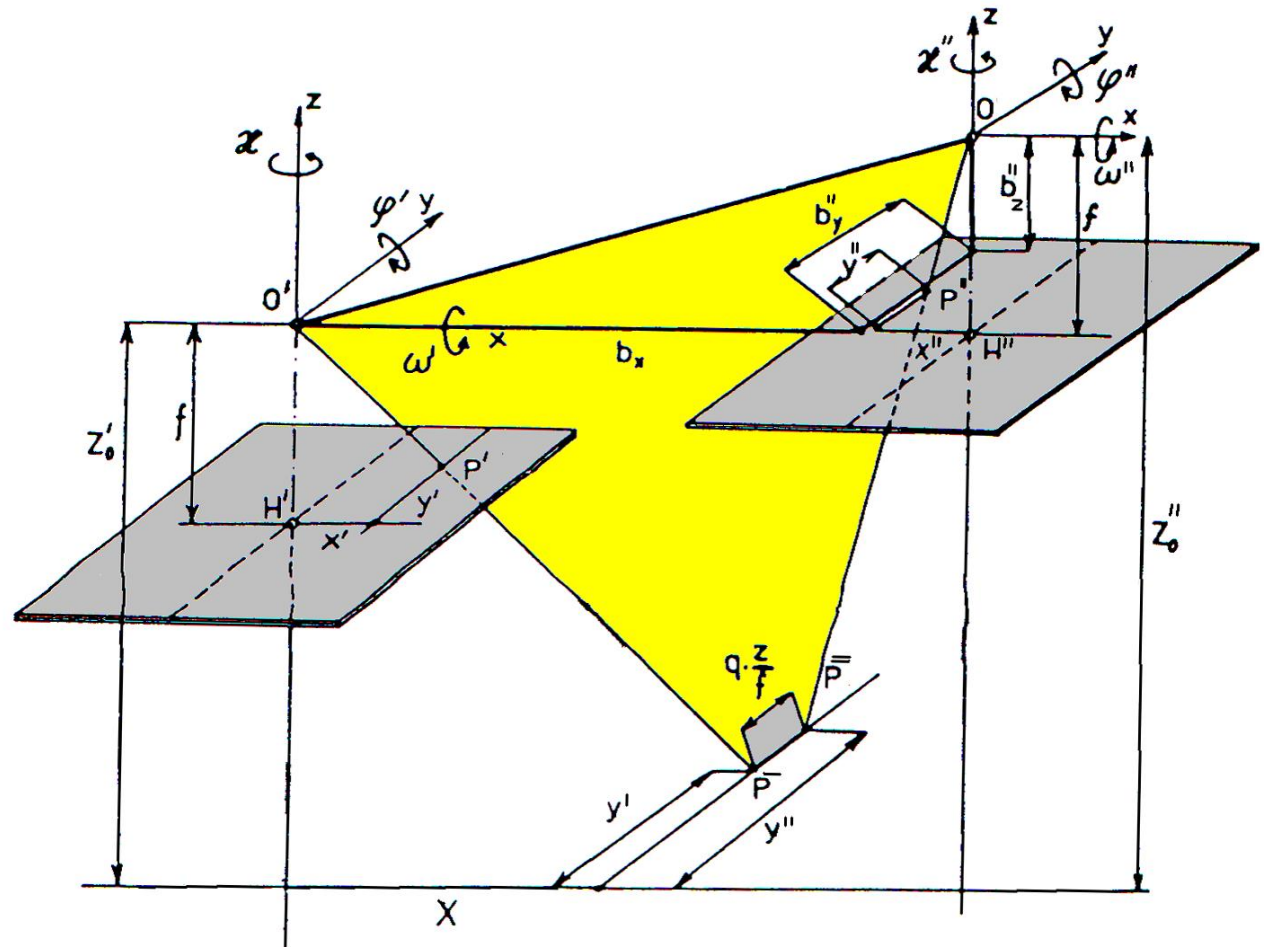
Letecká stereofotogrammetrie

Při leteckých aplikacích nelze zajistit standardizaci prvků vnější orientace

$$\mathbf{R} \neq \mathbf{E}$$

$$X = X_o + (Z - Z_o) \cdot \frac{r_{11} \cdot (x' - x'_o) + r_{12} \cdot (y' - y'_o) - r_{13} \cdot f}{r_{31} \cdot (x' - x'_o) + r_{32} \cdot (y' - y'_o) - r_{33} \cdot f}$$

$$Y = Y_o + (Z - Z_o) \cdot \frac{r_{21} \cdot (x' - x'_o) + r_{22} \cdot (y' - y'_o) - r_{23} \cdot f}{r_{31} \cdot (x' - x'_o) + r_{32} \cdot (y' - y'_o) - r_{33} \cdot f}$$



Fotogrammetrické technologie vyhodnocení obsahu snímků

*Analogová technologie
(zastaralá, nevyužívá se)*



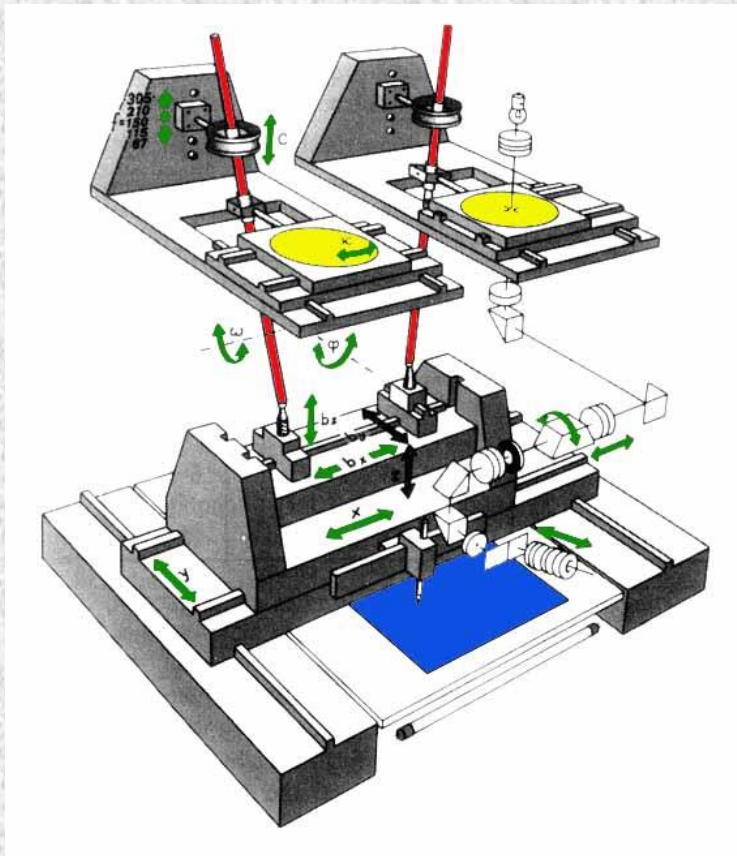
*Početní (analytická) technologie
- s využitím analogových strojů
a dílčích početních kroků
(klasická)*



*Analytická technologie
- nelze řešit bez počítače
- současnost*

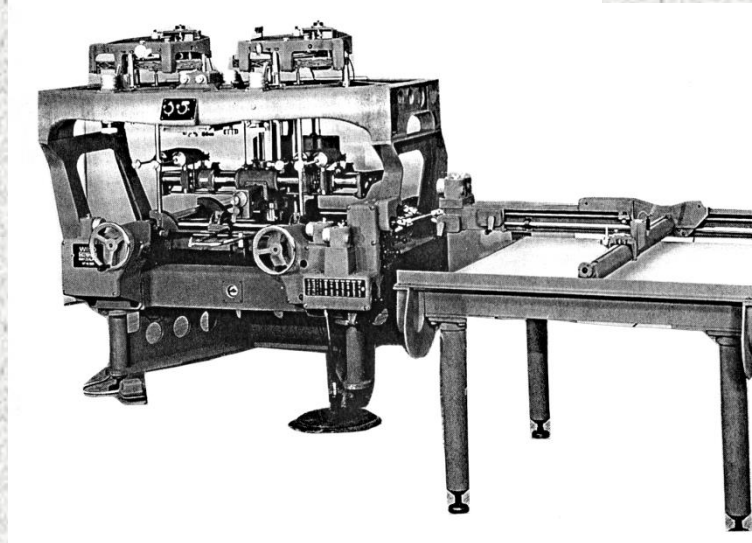
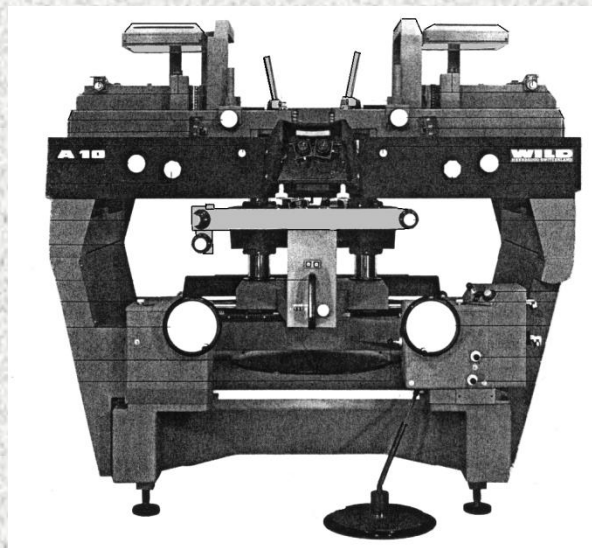
Prostorové vyhodnocení pomocí streofotogrammetrických zařízení

Analogové stroje



- vyráběny až do roku 1986 (Wild) a 1990 (Zeis Jena)
- složité a přesné mechanické zařízení, umožňující obnovení prvků vnější orientace
- vytváří se reálný stereoskopický model náklony a posuny snímků
- poslední modely s podporou výpočetní techniky
- ovládají se modelové souřadnice
- v současnosti zastaralé

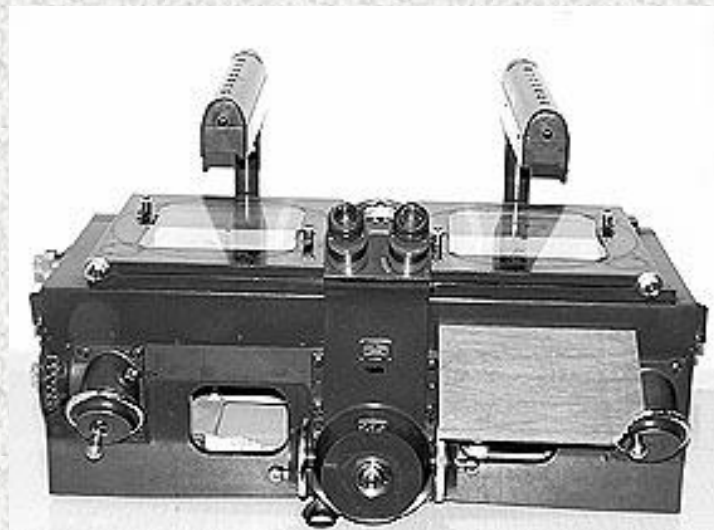
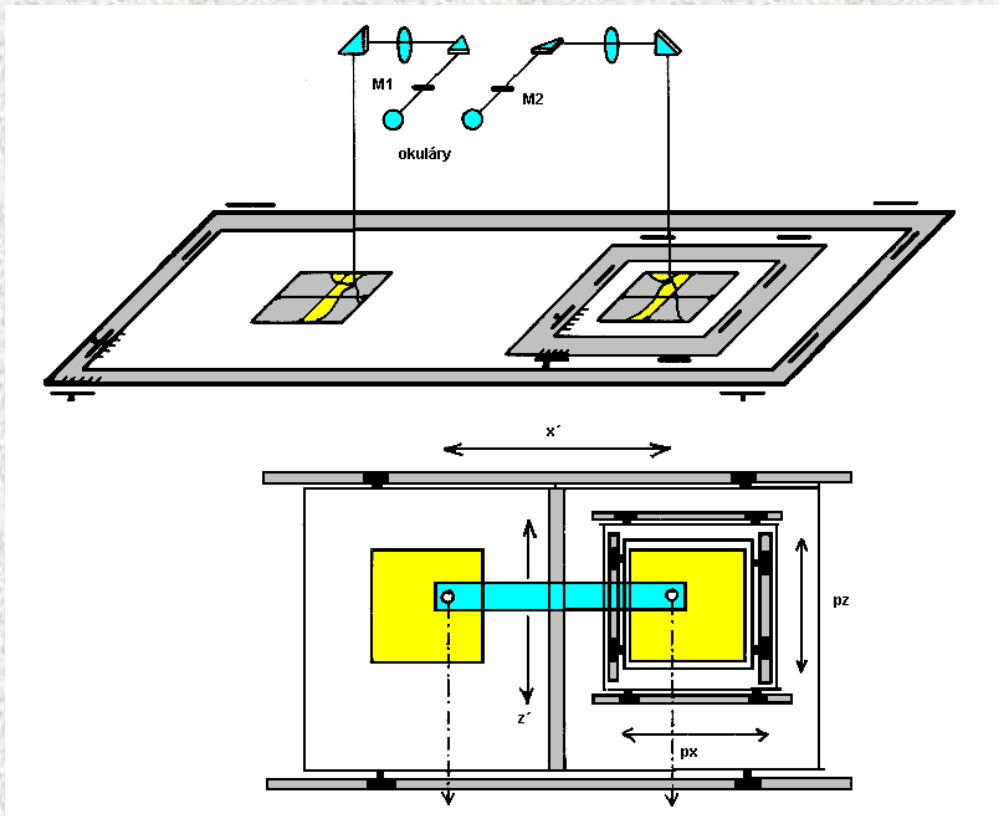
Analogové stroje



Stereometrograf, Topokart (Zeiss Jena)

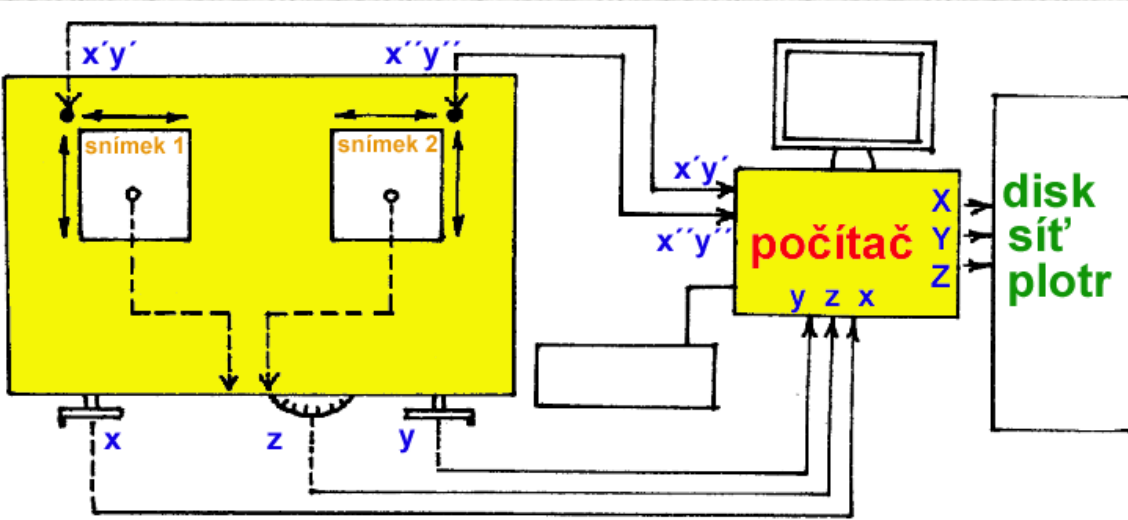
A-10 a A-7 (Wild)

analogové stroje-komparátory



Analytické stroje

- měří se na skutečných snímcích, nutný počítač
- nevytváří se reálný model
- nejpřesnější fm metoda
- ovládají se modelové souřadnice, na počítači se přepočítávají na snímkové
- pojízdné nosiče snímků se nastaví na vypočtené snímkové souřadnice



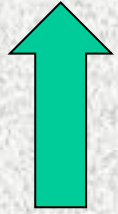
BC-1 (Wild, 1985)



SD 2000 (Leica, 1995)

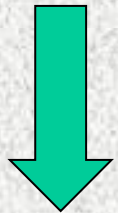
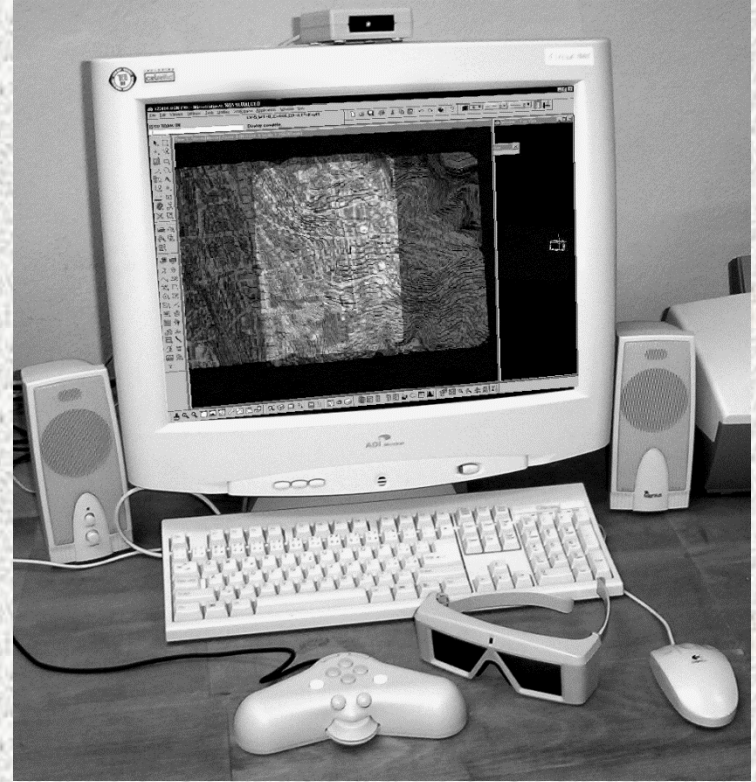


Digitální stanice



*Imagestation Unix
Helava (Leica)*

*Imagestation SSK
VSD*

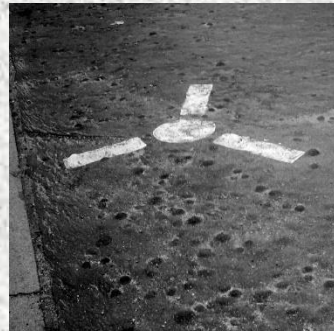


letecká fotogrammetrie

a) Projekt snímkového letu $m_S = \frac{h}{f}$ $m_Z = \frac{h}{b} m_S \cdot m_P$, $m_{XY} = m_S \cdot m_{x'y'}$

b) Provedení snímkového letu (analogové komory, digitální komory, přídatná zařízení)

c) Pozemní práce (vlíčovací body, signalizace)



d) Aerotringulace (cílem dnešní aerotriangulace je zejména tvorba nových vličovacích bodů přímo ze snímků pro pozdější podrobné vyhodnocení v optimálních polohách, vyrovnání celého bloku, které umožňuje návaznost vyhodnocování modelů po sobě a dále také přesný výpočet prvků vnitřní orientace každého snímku).

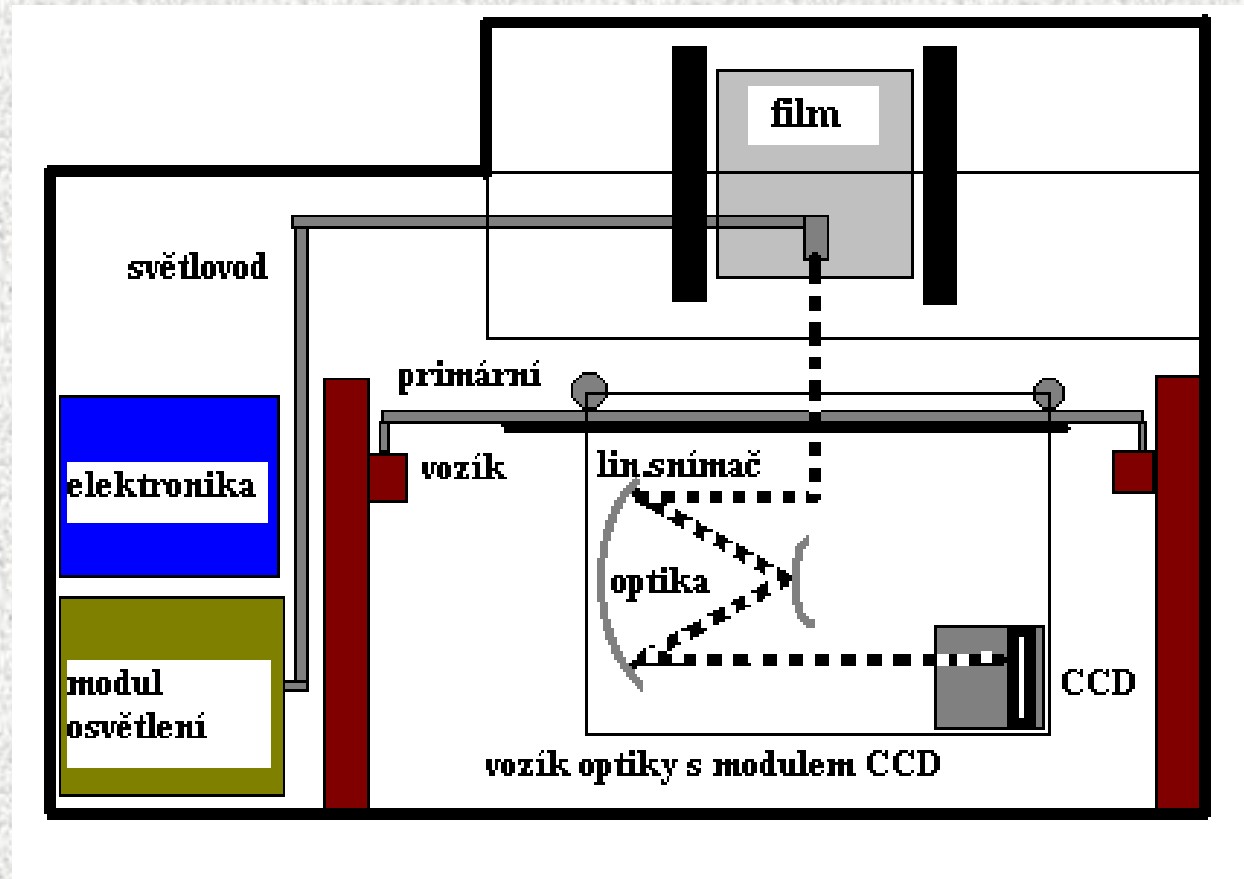
e) Klasifikace a místní šetření

f) Vyhodnocení obsahu snímků (polohopis, výškopis – DMT, tématické vyhodnocení)

- analogově, empiricky
- analogově za využití početních nebo semianalytických metod
- čistě analytickými metodami
- digitálně

letecká fotogrammetrie

skenování – digitalizace snímků



letecká fotogrammetrie

Snímkové orientace:

- *vnitřní orientace (prvky vnitřní orientace)*
- *vnější orientace (souřadnice středu vstupní pupily X_0, Y_0, Z_0 , dále sklony ω, φ, κ)*

Pro stereo-vyhodnocení fotogrammetrických snímků se vnější orientace určuje jako:

- přímý transformační vztah na základě komplexního řešení - vyrovnání paprskových svazků
- starší postup po krocích, které se nazývají:
 - a) **relativní orientace** (vzájemná orientace mezi oběma stereosnímky, vytvoření libovolně prostorově orientovaného virtuálního stereo-modelu)*
 - b) **absolutní orientace** (měřítková úprava, pootočení a posun modelu do referenčního geodetického systému)*

letecká stereofotogrammetrie

Vyhodnocení stereosnímků při známých parametrech vnější orientace

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$$

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(x' - x'_0) + r_{12}(y' - y'_0) - r_{13}f}{r_{31}(x' - x'_0) + r_{32}(y' - y'_0) - r_{33}f}$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(x' - x'_0) + r_{22}(y' - y'_0) - r_{23}f}{r_{31}(x' - x'_0) + r_{32}(y' - y'_0) - r_{33}f}$$



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

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

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

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

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

letecká stereofotogrammetrie

Vyhodnocení stereosnímků při neznámých parametrech vnější orientace

Zásadně lze určení prvků vnější orientace rozdělit na metody:

Empirické (dnes nevyužívané)

- a) **relativní orientace (základem je postupné ruční odstraňování vertikálních paralax na orientačních bodech s přímým zaváděním empirických oprav)**
- relativní orientace nezávislé dvojice
 - relativní orientace při připojení snímku
- b) **absolutní orientace (posun, pootočení, určení měřítka, nastavení výšek, náklon modelu)**

Početní (klasické)

- a) **relativní orientace (základem je měření vertikálních paralax na minimálně pěti orientačních bodech stereokomparátorem nebo ve vyhodnocovacím přístroji s následným výpočtem neznámých prvků). Rozlišuje se zde:**
- relativní orientace nezávislé dvojice (změna orientace obou snímků)
 - relativní orientace při připojení snímku (změna orientace pouze jednoho snímku)
- b) **absolutní orientace (výpočet prvků pomocí linearizovaných vztahů s následným vyrovnáním)**

Analytické

Využití přímého vztahu mezi měřenými snímkovými souřadnicemi a geodetickými souřadnicemi referenčního systému; základem je měření snímkových souřadnic.

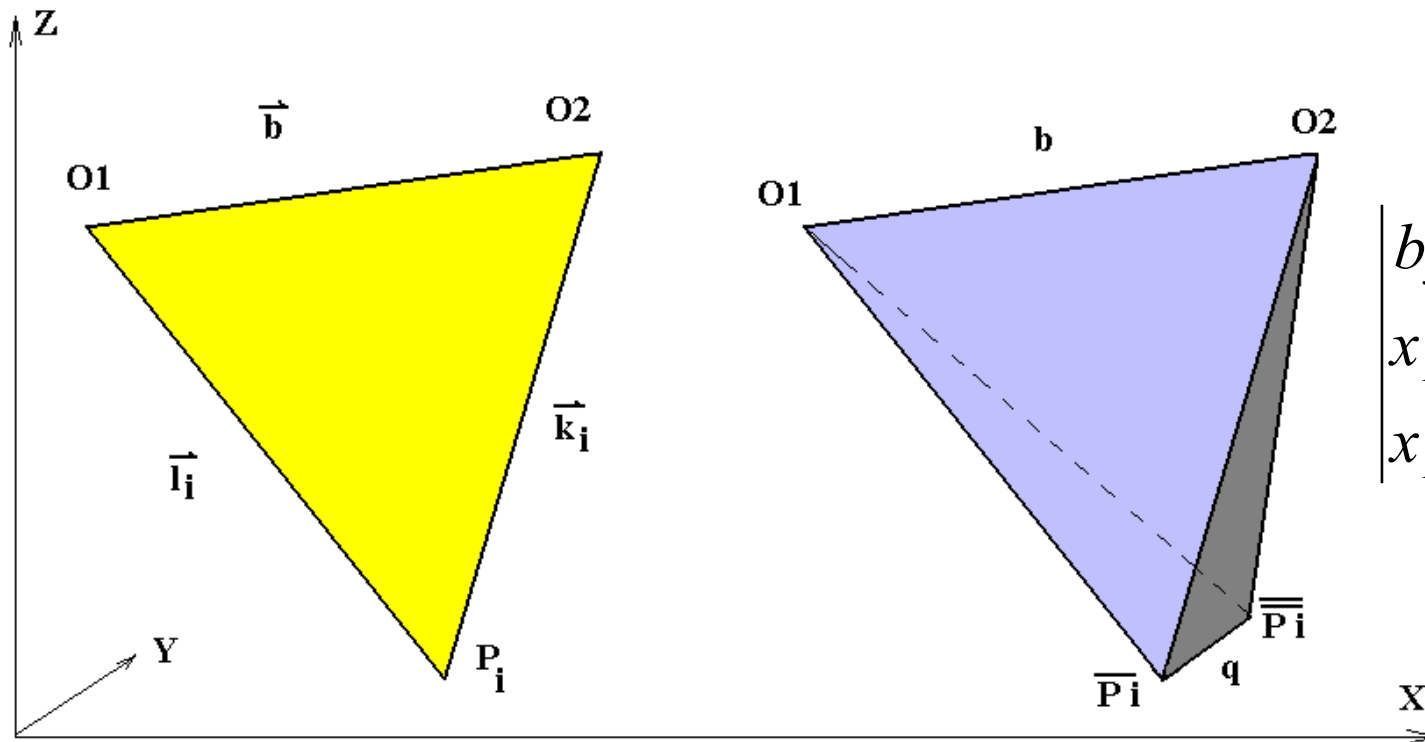
- **komplexní řešení** (v jediném kroku je řešena komplexně celá orientace včetně výpočtu podrobných bodů, svazkové vyrovnání)
- **etapové řešení** (řešení je rozloženo do kroků, blokové vyrovnání)

letecká fotogrammetrie

Při početním určení prvků relativní orientace můžeme vycházet z různých podmínek, jejichž splnění zaručuje vyřešení relativní orientace. Mezi nejznámější metody patří **podmínka komplanarity** a **podmínka nulových vertikálních paralax**. Obecně můžeme při relativní orientaci určit **pět** neznámých prvků, pro které je nutno sestavit minimálně pět rovnic.

Podmínka komplanarity

$$(\mathbf{b}, \mathbf{k}_i, \mathbf{l}_i) = 0, \quad i = 1, \dots, 5$$



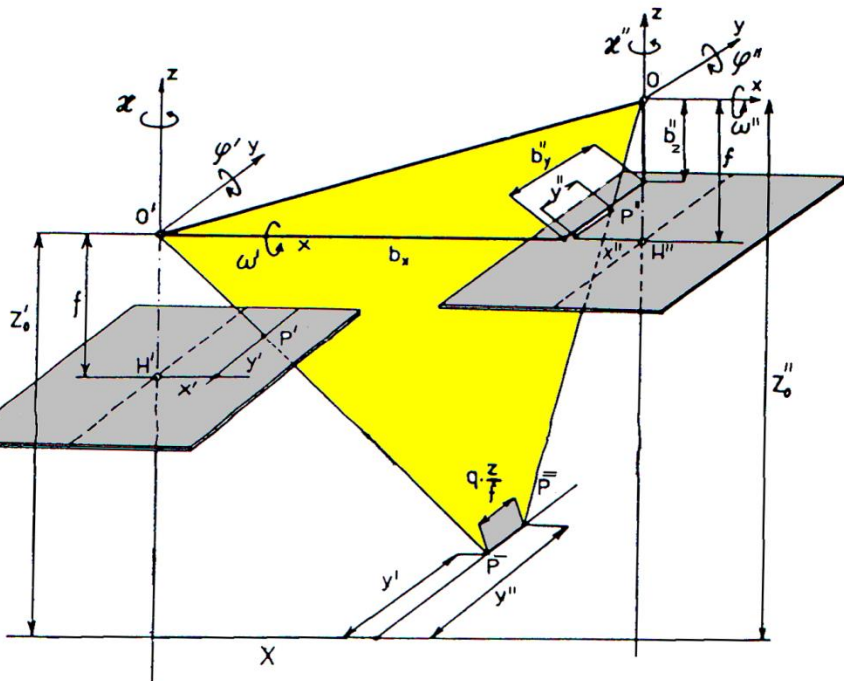
letecká fotogrammetrie

Podmínka nulových vertikálních paralax

$$x'_s = -f \frac{r_{11}x' + r_{12}y' - r_{13}f}{r_{31}x' + r_{32}y' - r_{33}f}, \quad y'_s = -f \frac{r_{21}x' + r_{22}y' - r_{23}f}{r_{31}x' + r_{32}y' - r_{33}f}$$

$$\Delta x' = x'_s - x' = -y'd\kappa' - \left(f + \frac{x'^2}{f}\right)d\varphi' + \frac{x'y'}{f}d\omega' + db'_x + \frac{x'}{f}db'_z$$

$$\Delta y' = y'_s - y' = x'd\kappa' - \frac{x'y'}{f}d\varphi' + \left(f + \frac{y'^2}{f}\right)d\omega' + db'_y + \frac{y'}{f}db'_z$$



$$y'_s - y''_s = y' + \Delta y' - y'' - \Delta y''$$

$$0 = q + \Delta y' - \Delta y''$$

$$0 = q + x'd\kappa' - \frac{x'y'}{f}d\varphi' + \left(f + \frac{y'^2}{f}\right)d\omega' + db'_y + \frac{y'}{f}db'_z -$$

$$- x''d\kappa'' + \frac{x''y''}{f}d\varphi'' - \left(f + \frac{y''^2}{f}\right)d\omega'' - db''_y - \frac{y''}{f}db''_z$$

V této rovnici je celkem 8 orientačních elementů, z nichž je ale jen 5 nezávislých; můžeme proto volit 3 elementy nejlépe jako nulové. Podle toho, které zvolíme jako nezávislé, hovoříme o **relativní orientaci nezávislé dvojice** nebo o **relativní orientaci při připojení snímku**.

letecká fotogrammetrie

Relativní orientace nezávislé dvojice

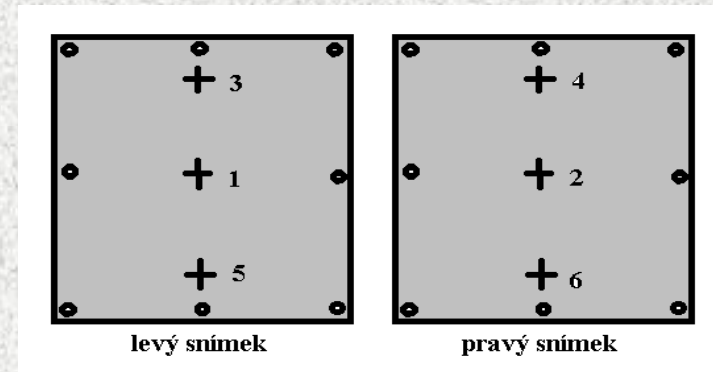
Jako určované neznámé se volí rotace $d\kappa', d\varphi', d\kappa'', d\varphi'', \Delta\omega = d\omega' - d\omega''$.

předpoklad $y' \cong y''$

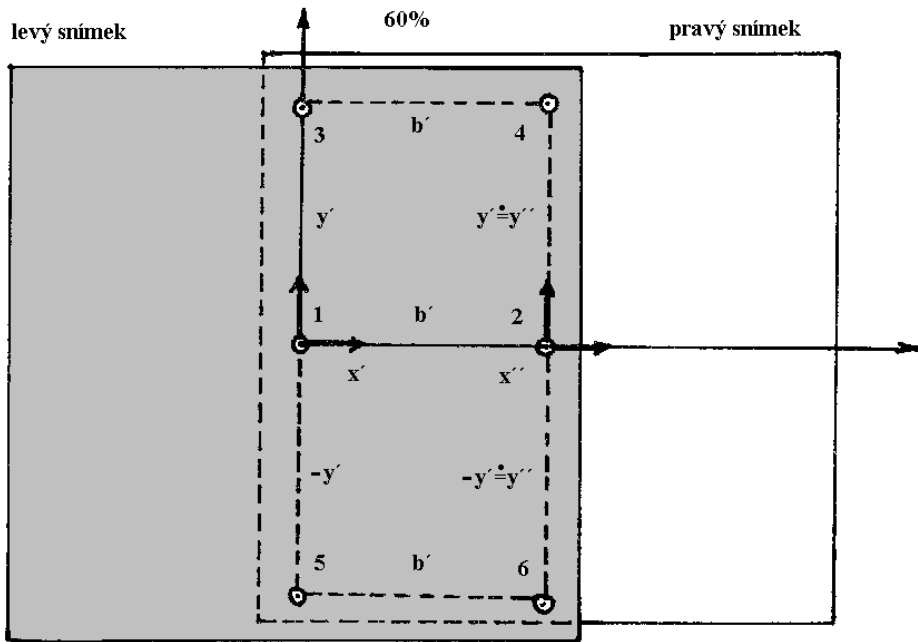
$$0 = q + x'd\kappa' - x'd\kappa'' - \frac{x'y'}{f}d\varphi' + \frac{x'y'}{f}d\varphi'' + \left(f + \frac{y'^2}{f}\right)\Delta\omega$$

$$\left(f + \frac{y'^2}{f}\right)d\omega' - \left(f + \frac{y''^2}{f}\right)d\omega'' \cong \left(f + \frac{y'^2}{f}\right)(d\omega' - d\omega'') = \left(f + \frac{y'^2}{f}\right)\Delta\omega$$

orientační bod	levý snímek x'	levý snímek y'	pravý snímek x''	pravý snímek y''
1	0	0	$-b'$	0
2	$+b'$	0	0	0
3	0	$+y'$	$-b'$	$+y'$
4	$+b'$	$+y'$	0	$+y'$
5	0	$-y'$	$-b'$	$-y'$
6	$+b'$	$-y'$	0	$-y'$



letecká fotogrammetrie



$$0 = q_1 + b' d\kappa'' + f\Delta\omega$$

$$0 = q_2 + b' d\kappa' + f\Delta\omega$$

$$0 = q_3 + b' d\kappa'' - \frac{b' y'}{f} d\varphi'' + \left(f + \frac{y'^2}{f} \right) \Delta\omega$$

$$0 = q_4 + b' d\kappa' - \frac{b' y'}{f} d\varphi' + \left(f + \frac{y'^2}{f} \right) \Delta\omega$$

$$0 = q_5 + b' d\kappa'' + \frac{b' y'}{f} d\varphi'' + \left(f + \frac{y'^2}{f} \right) \Delta\omega$$

$$0 = q_6 + b' d\kappa' + \frac{b' y'}{f} d\varphi' + \left(f + \frac{y'^2}{f} \right) \Delta\omega$$

Ietecká fotogrammetrie

Relativní orientace při připojení snímku

Jako určované neznámé se volí rotace $d\kappa''$, $d\varphi''$, $d\omega''$, db''_y , db''_z .

$$0 = q - x''d\kappa'' + \frac{x''y''}{f}d\varphi'' - \left(f + \frac{y''^2}{f}\right)d\omega'' - db''_y - \frac{y''}{f}db''_z$$

$$0 = q_1 + b'd\kappa'' - fd\omega'' - db''_y$$

$$0 = q_2 - fd\omega'' - db''_y$$

$$0 = q_3 + b'd\kappa'' - \frac{b'y''}{f}d\varphi'' - fd\omega'' - \frac{y''^2}{f}d\omega'' - db''_y - \frac{y''}{f}db''_z$$

$$0 = q_4 - fd\omega'' - \frac{y''^2}{f}d\omega'' - db''_y - \frac{y''}{f}db''_z$$

$$0 = q_5 + b'd\kappa'' + \frac{b'y''}{f}d\varphi'' - fd\omega'' - \frac{y''^2}{f}d\omega'' - db''_y + \frac{y''}{f}db''_z$$

$$0 = q_6 - fd\omega'' - \frac{y''^2}{f}d\omega'' - db''_y + \frac{y''}{f}db''_z$$

letecká fotogrammetrie

Absolutní orientace

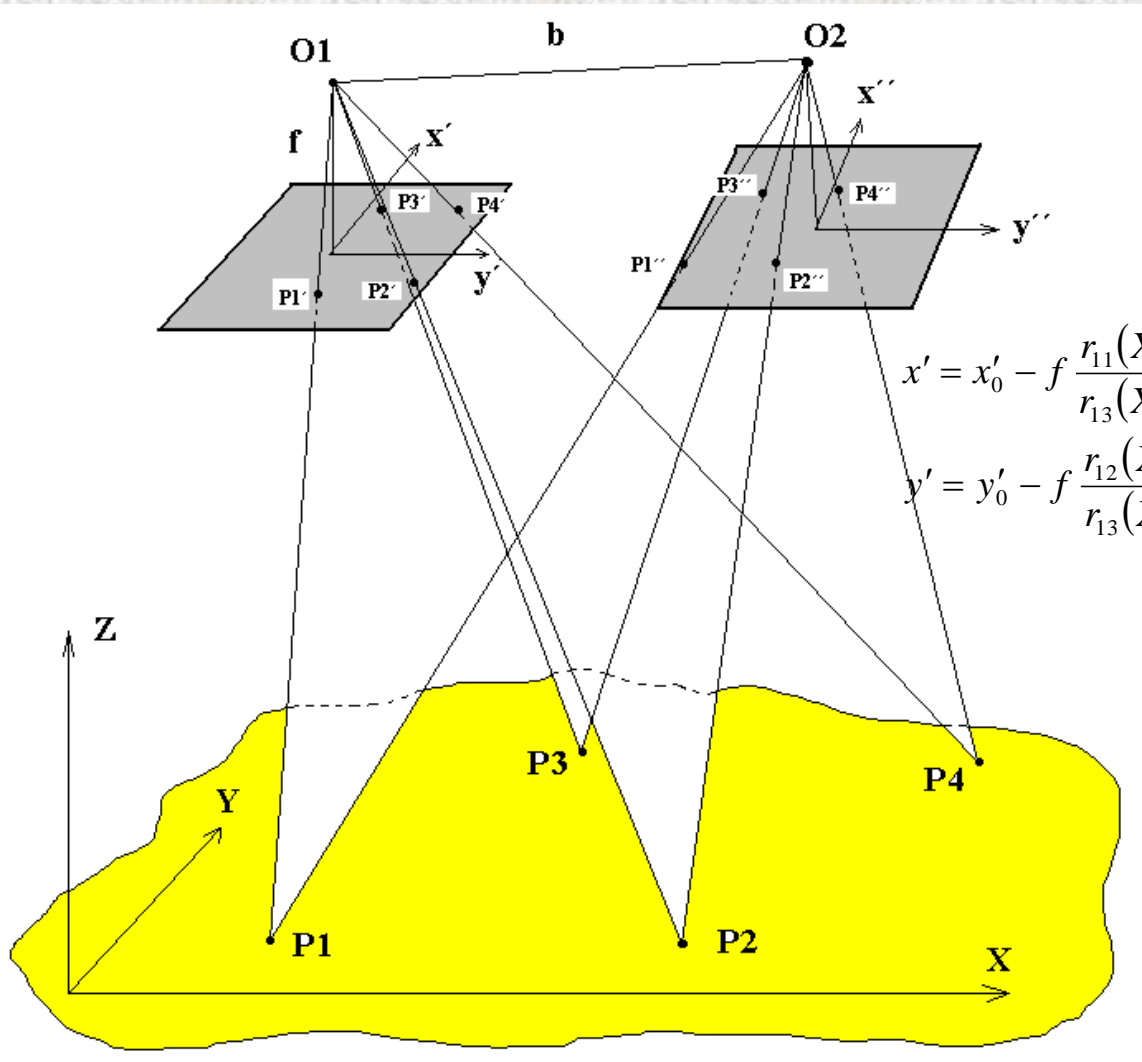
$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + m \cdot \mathbf{R} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

kde X, Y, Z jsou geodetické souřadnice, X_0, Y_0, Z_0 jsou geodetické souřadnice počátku soustavy modelových souřadnic x, y, z , m je měřítko modelu a \mathbf{R} je matice prostorové rotace systému modelových souřadnic v systému geodetických souřadnic, obsahující tři úhly Ω, Φ, K . Vztah (14.12) je prostorová podobnostní transformace s neznámými $X_0, Y_0, Z_0, m, \Omega, \Phi, K$.

$$M = \begin{pmatrix} m_x & 0 & 0 \\ 0 & m_y & 0 \\ 0 & 0 & m_z \end{pmatrix}$$

Analytické metody

Komplexní řešení



$$x' = x'_0 - f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = x'_0 - f \frac{\mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{X}}{\mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{X}}$$
$$y' = y'_0 - f \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = y'_0 - f \frac{\mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{X}}{\mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{X}}$$

Analytické metody

Komplexní řešení

$$x'_{i1} = F_x(f, x'_0 = d'x, X_{01}, Y_{01}, Z_{01}, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1, X_i, Y_i, Z_i)$$

$$y'_{i1} = F_y(f, y'_0 = d'y, X_{01}, Y_{01}, Z_{01}, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1, X_i, Y_i, Z_i)$$

$$x''_{i2} = F_x(f, x''_0 = d''x, X_{02}, Y_{02}, Z_{02}, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2, X_i, Y_i, Z_i)$$

$$y''_{i2} = F_y(f, y''_0 = d''y, X_{02}, Y_{02}, Z_{02}, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2, X_i, Y_i, Z_i)$$

$$f(x_1, \dots, x_n) = f(x_1^0, \dots, x_n^0) + \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \right)^0 dx_1 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \right)^0 dx_n$$

$$\begin{aligned} v_{xij} = & \left(\frac{\partial x'}{\partial X_{0j}} \right)^0 dX_{0j} + \left(\frac{\partial x'}{\partial Y_{0j}} \right)^0 dY_{0j} + \left(\frac{\partial x'}{\partial Z_{0j}} \right)^0 dZ_{0j} + \\ & + \left(\frac{\partial x'}{\partial \omega_j} \right)^0 d\omega_j + \left(\frac{\partial x'}{\partial \varphi_j} \right)^0 d\varphi_j + \left(\frac{\partial x'}{\partial \kappa_j} \right)^0 d\kappa_j + \\ & + \left(\frac{\partial x'}{\partial X_i} \right)^0 dX_i + \left(\frac{\partial x'}{\partial Y_i} \right)^0 dY_i + \left(\frac{\partial x'}{\partial Z_i} \right)^0 dZ_i - (x'_{ij} - x'_{ij}{}^0) \end{aligned}$$

Analytické metody

Komplexní řešení $\mathbf{v} = \mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{x}_1 + \mathbf{A}_2 \cdot \mathbf{x}_2 - \mathbf{l} \iff (\mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} - \mathbf{l})$

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \mathbf{l}$$

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} = \mathbf{N} \quad \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{l} = \mathbf{n}$$

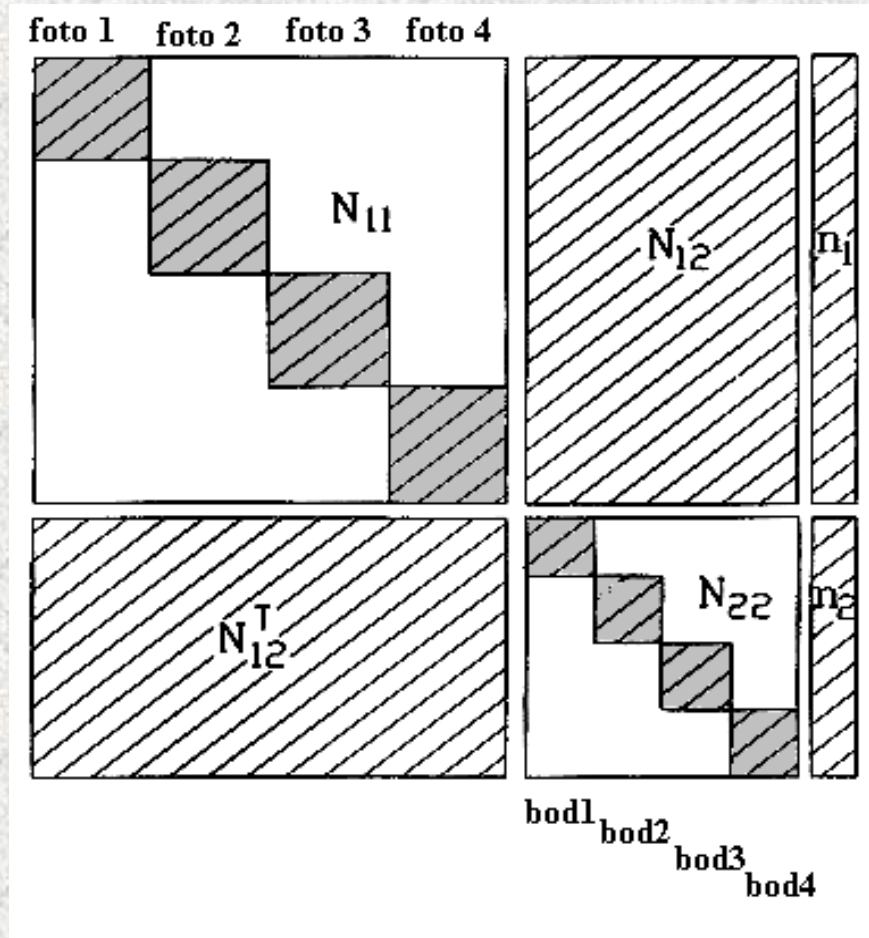
$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} - \mathbf{l}$$



$$\mathbf{N} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{n}$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{N}_{11} & \mathbf{N}_{12} \\ \mathbf{N}_{12}^T & \mathbf{N}_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{n}_1 \\ \mathbf{n}_2 \end{pmatrix}$$

$$\left(\mathbf{N}_{11} - \mathbf{N}_{12} \cdot \mathbf{N}_{22}^{-1} \cdot \mathbf{N}_{12}^T \right) \mathbf{x}_1 = \mathbf{n}_1 - \mathbf{N}_{12} \cdot \mathbf{N}_{22}^{-1} \cdot \mathbf{n}_2$$



Analytické metody

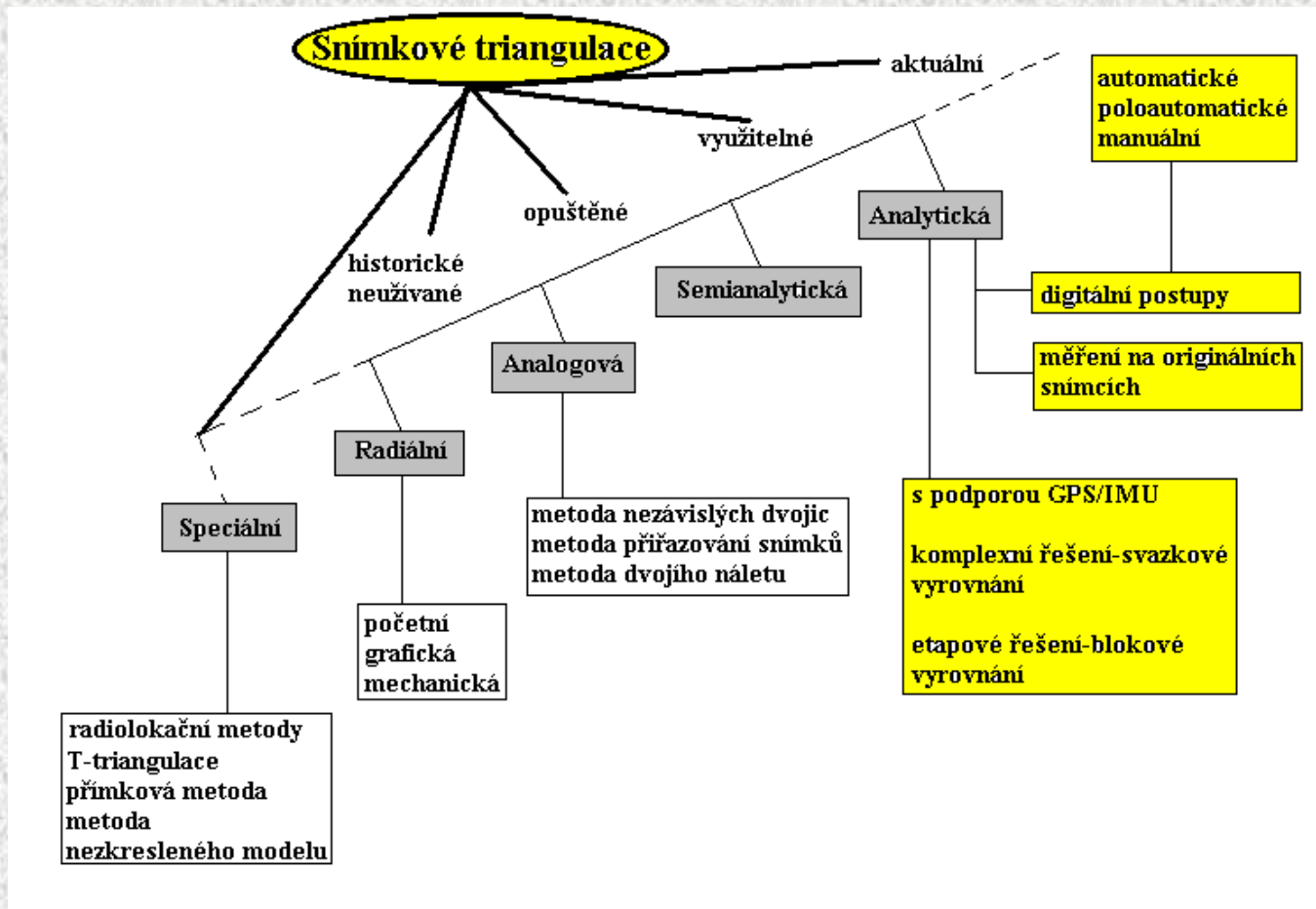
Etapové řešení

$x', y', z' (= -f), x'', y'', z'' (= -f) \rightarrow \text{rel.or.} \rightarrow x'_P, y'_P, z'_P, x''_P, y''_P, z''_P \rightarrow$
 $\rightarrow \text{měřítková úprava} \rightarrow x, y, z \rightarrow \text{abs.or.} \rightarrow X, Y, Z$

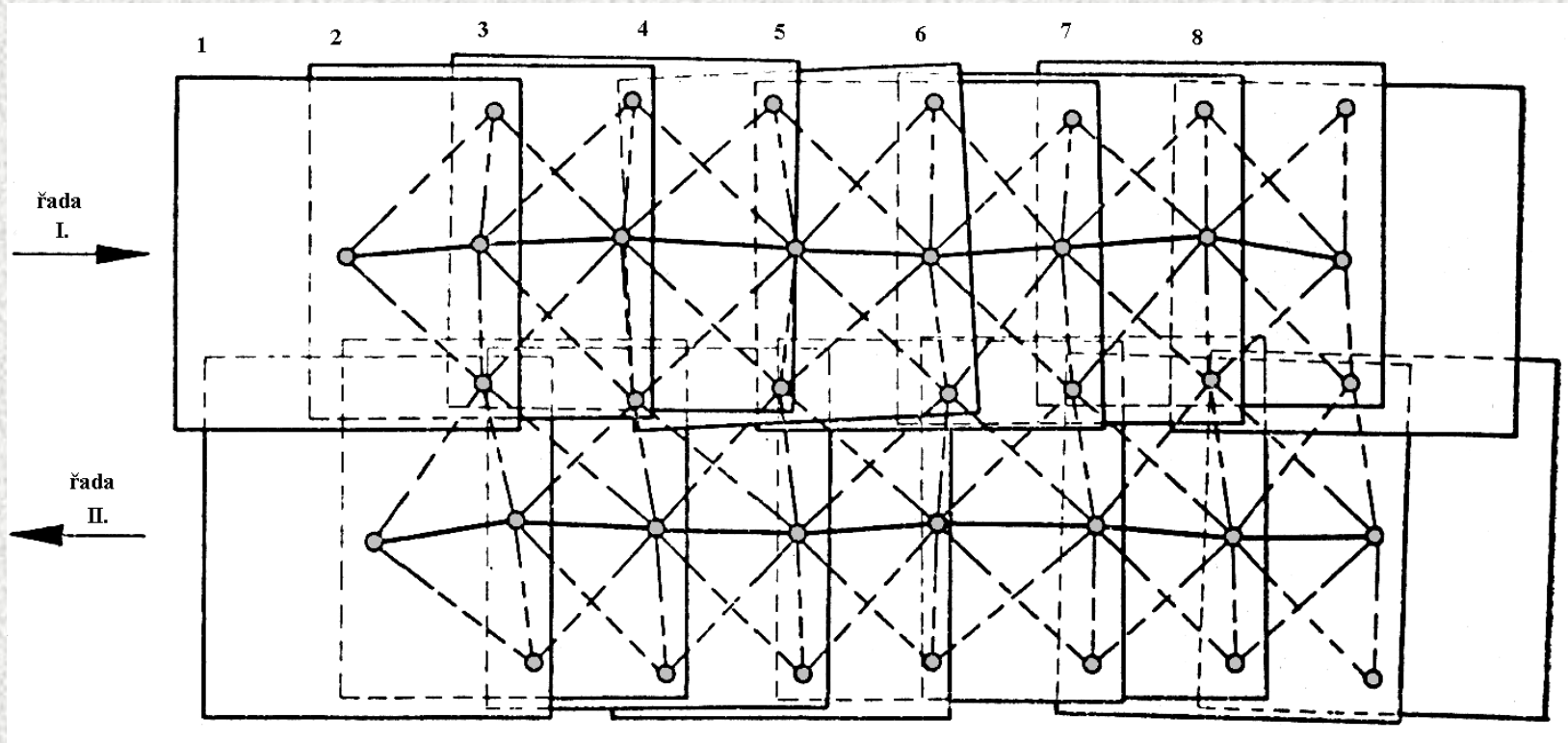
Snímkové triangulace

Cílem dnešní analytické aerotriangulace je:

- **získání vlíčovacích bodů pro podrobné vyhodnocení**
- **vyrovnání souboru snímků nebo modelů pro zajištění kontinuálního vyhodnocení**
- **přesný výpočet prvků vnější orientace pro všechny snímky**



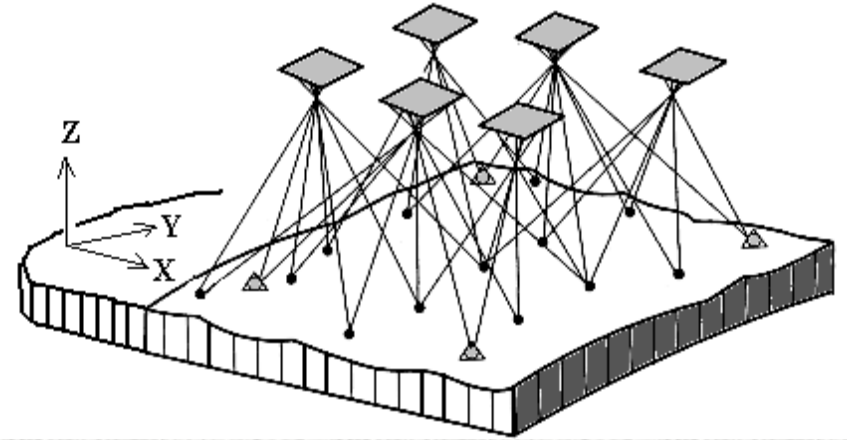
Snímkové triangulace



Úplná trojúhelníková radiální síť a běžný blok snímků při radiální triangulaci

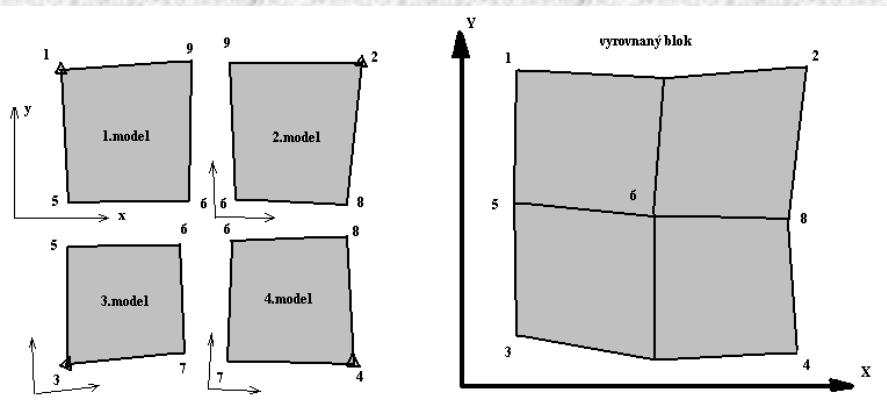
Snímkové triangulace

Svazkové vyrovnání bloku (komplexní řešení)



Blokové vyrovnání (etapové řeš.)

- polohové
- prostorové
- výškové



integrováný INS



INS (Inertial Navigation System) a nebo GNSS/IMU (Inertial Measurement Unit).

digitální fotogrammetrie

Teorie obrazové korelace

$$\rho(A, B) = \frac{\text{cov}(A, B)}{\rho(A) \cdot \rho(B)}$$

Chceme-li vypočítat korelační koeficient pro dva stejně velké digitální obrazy (nebo jejich výřezy), budeme používat k výpočtu hodnoty pixelu $p(A)_{i,j}$ pro obraz **A** a $p(B)_{i,j}$ pro obraz **B**.

Obdržíme výraz:

$$r(A, B) = \frac{C(A, B)}{\sqrt{C(A) \cdot C(B)}}$$

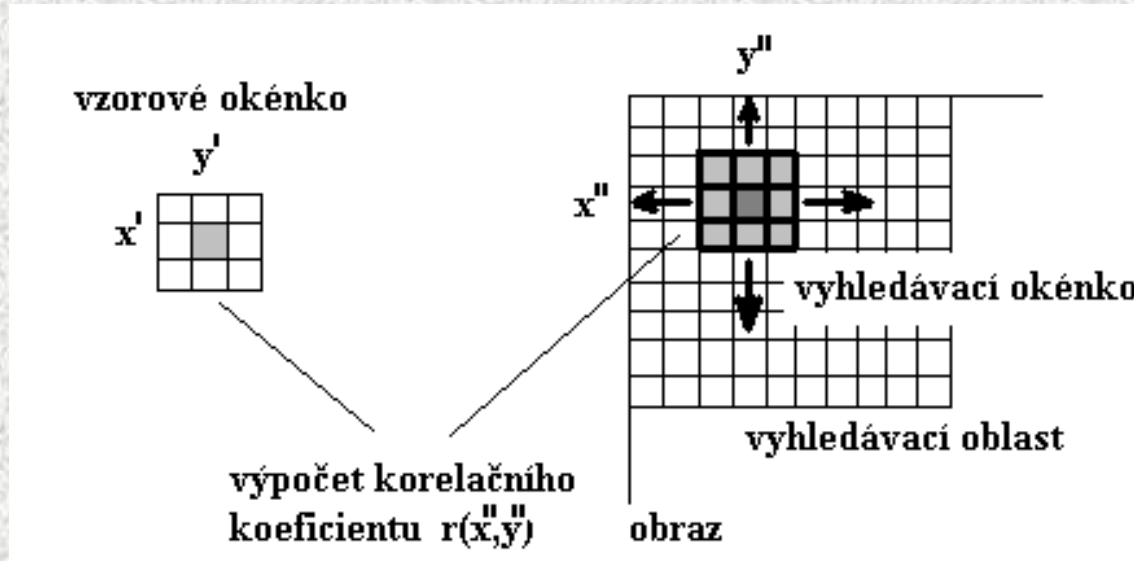
kde jednotlivé výrazy jsou (n je počet pixelů ve straně čtvercového okna):

$$C(A, B) = \frac{1}{n^2 - 1} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(p(A)_{i,j} - \bar{p}(A) \right) \cdot \left(p(B)_{i,j} - \bar{p}(B) \right)$$

$$C(A) = \frac{1}{n^2 - 1} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(p(A)_{i,j} - \bar{p}(A) \right)^2, \quad \bar{p}(A) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(p(A)_{i,j} \right)$$

$$C(B) = \frac{1}{n^2 - 1} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(p(B)_{i,j} - \bar{p}(B) \right)^2, \quad \bar{p}(B) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(p(B)_{i,j} \right)$$

digitální fotogrammetrie



Hledáme její maximum se subpixelovou přesností. Vzhledem k tomu, že maximálních hodnot dosahuje pouze v omezené oblasti, můžeme diskrétní korelační funkci nahradit spojitou funkcí a popsat ji např. polynomem druhého stupně:

$$r = \bar{r} + v = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2$$

kde x_i, y_i je poloha vyhledávacího okénka pro vypočtenou hodnotu korelačního koeficientu r_i , pokud máme matici 3x3 korelačních koeficientů, obdržíme 9 hodnot. Celkem 6 jich potřebujeme pro výpočet koeficientů a_i

digitální fotogrammetrie

Subpixelová transformace

$$p_B(x) = p_A(x + a_1)$$

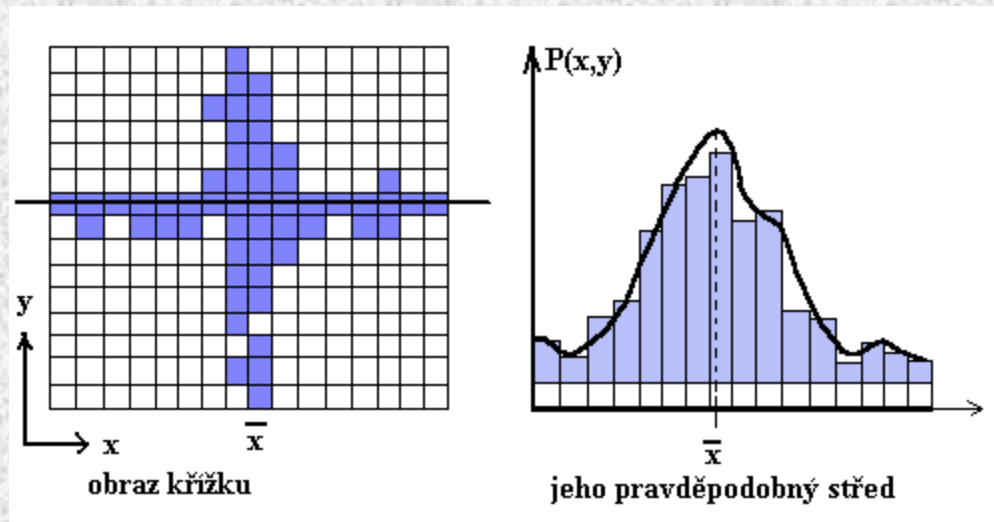
$$p_B(y) = p_A(y + a_2)$$

$$v_x + p_B(x) = p_A(x + a_1)a_3 + a_5$$

$$v_y + p_B(y) = p_A(y + a_2)a_4 + a_6$$

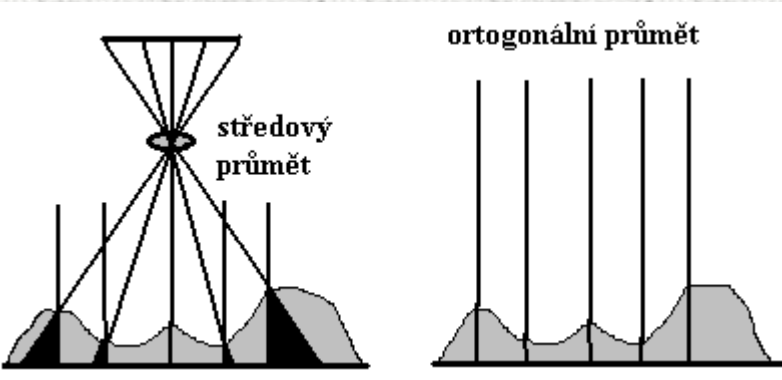
$$v_x + p_B(x) = p_A \cdot a_3(x) + p'_A \cdot a_3 a_1(x) + a_5$$

$$v_y + p_B(y) = p_A \cdot a_4(y) + p'_A \cdot a_4 a_2(y) + a_6$$

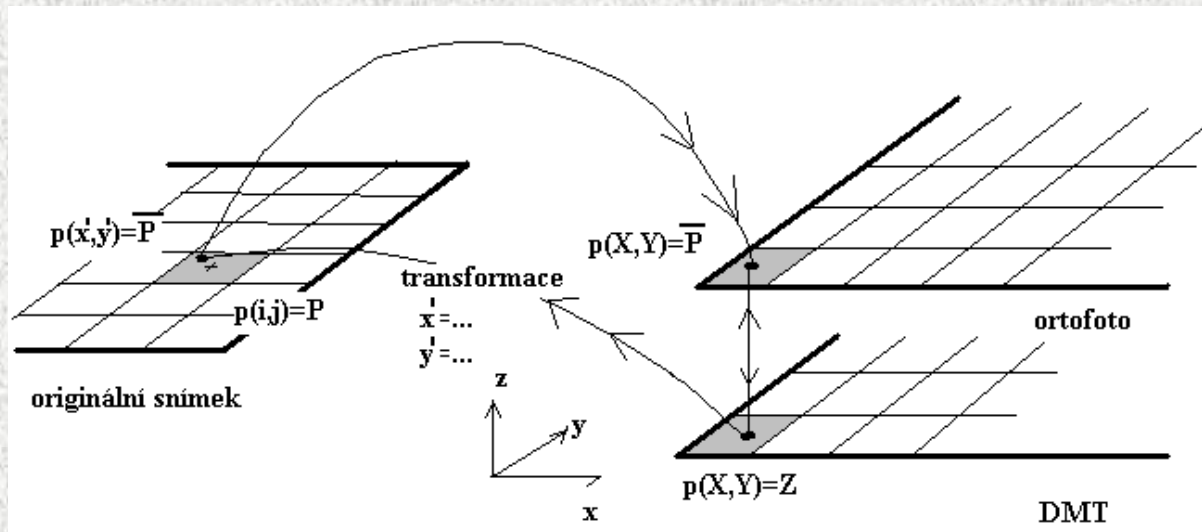


digitální fotogrammetrie

Digitální ortofoto



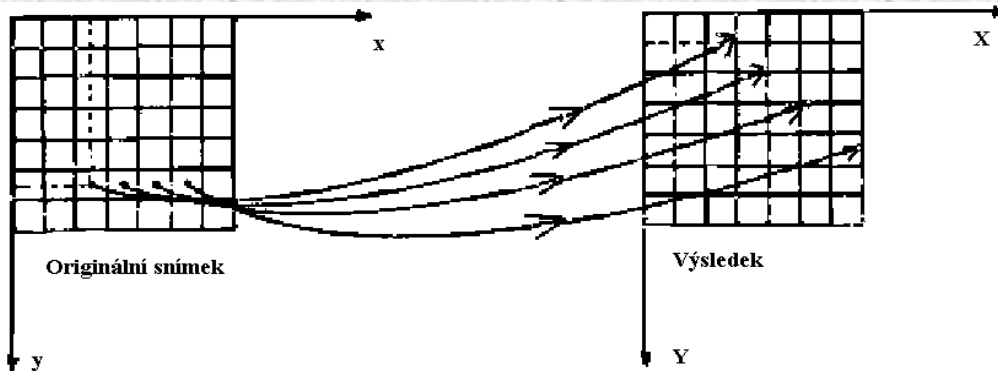
$$x' = x'_0 - f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$
$$y' = y'_0 - f \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$



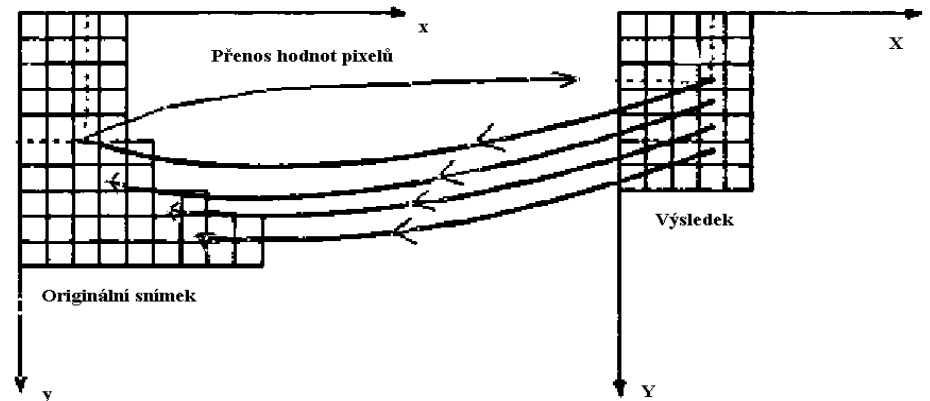
Geometrická transformace

Cílem geometrické transformace je buď odstranění zkreslení obrazu způsobeného nestálostí geometrických podmínek v průběhu měření a převod dat do vhodné projekce (zejména v DPZ) nebo metoda tvorby nového obrazu (např. ortofota) na základě transformačních vztahů. Geometrickou korekci lze provádět celkem třemi různými způsoby:

- transformace dat na základě přesně známých parametrů trajektorie nosiče
- přímá geometrická transformace na základě vlíčovacích bodů nebo vektorů
- přímá geometrická transformace na základě vlíčovacích bodů nebo vektorů



- přenos dat z původní obrazové matice do matice korigované
- Metoda nejbližšího souseda*
- Bilineární transformace*
- Bikubická konvoluce*



konec