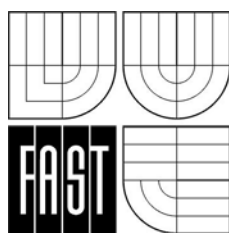


VLASTIMIL HANZL

FOTOGRAMMETRIE

MODUL 01

TEORETICKÉ ZÁKLADY FOTOGRAMMETRIE



STUDIJNÍ OPORY
PRO STUDIJNÍ PROGRAMY S KOMBINOVANOU FORMOU STUDIA

OBSAH

1 Úvod	7
1.1 Cíle	7
1.2 Požadované znalosti	7
1.3 Doba potřebná ke studiu	7
1.4 Klíčová slova	7
2 Matematické základy fotogrammetrie	9
2.1 Rotace v rovině	9
2.2 Rotace v prostoru	10
2.3 Centrální projekce v prostoru	11
2.4 Centrální projekce v rovině	14
2.5 Rovinné transformace	14
2.6 Robustní vyrovnání	17
3 Určení orientace a polohy bodu ze dvou snímků	18
3.1 Určení polohy bodu když prvky vnější orientace jsou známy	18
3.2 Prvky vnější orientace snímku nejsou známy	19
3.2.1 Určení prvků vnější orientace samostatně pro každý snímek	19
3.2.2 Určení prvků vnější orientace společně pro oba snímky	21
3.2.3 Společná orientace dvou snímků pomocí relativní a absolutní orientace	21
3.2.3.1 Relativní orientace	23
3.2.3.2 Deformace modelu	25
3.2.4 Absolutní orientace	27
3.2.5 Fundamentální matice	28
3.2.6 Normální případ	29
4 Aerotriangulace	31
4.1 Vyrovnání bloku svazků (bundle block adjustment)	32
4.2 Metoda nezávislých modelů	35
4.3 Přesnost aerotriangulace	35
4.4 Přídavné parametry	37
4.5 Aerotriangulace s podporou GNSS	39
4.6 Automatizace v aerotriangulaci	42
5 Blízká fotogrammetrie	43
5.1 Kamery pro blízkou fotogrammetrii	43
5.2 Metoda svazkového vyrovnání v blízké fotogrammetrii	44
5.3 Metoda přímé lineární transformace	45
5.4 Přesnost blízké fotogrammetrie	46
5.4.1 Hlavní faktory omezující přesnost fotogrammetrických měření	48
5.4.2 Kalibrace neměřických kamer	50
5.5 Aplikace blízké fotogrammetrie	51
6 Pořízení leteckých snímků	54
6.1 Měřické letecké kamery	54

6.2	Digitální kamery	58
6.2.1	Digitální kamera DMC – Digital Mapping Camera	58
6.2.2	UltraCamD	59
6.2.3	Středoformátové kamery	60
6.3	Faktory ovlivňující ostrost snímku	61
6.3.1	Mez rozlišovací schopnosti daná ohybem světla.	61
6.3.2	Rozlišovací schopnost fotografické vrstvy.	61
6.3.3	Smaz	62
6.4	Plánování letu	63
6.5	Vlícovací body v letecké fotogrammetrii	64
6.6	Snímkovací letadla	67
6.7	Filmy pro letecké měřické kamery.	68
7	Přímá orientace snímače	70
7.1	Principy integrace GPS/IMU	72
7.2	Inerciální systémy - základní pojmy	74
7.2.1	Inerciální referenční systém (Inertial Reference Frame, IRF systém)	74
7.2.2	Lokální referenční systém (Local Level Frame, LL-systém).	74
7.2.3	Souřadnicový systém nosiče měřícího zařízení (Body Frame B-systém).	74
7.3	Zpracování inerciálních měření	74
7.3.1	Metoda nejmenších čtverců	76
7.3.2	Metoda nejmenších čtverců – sekvenční	77
7.3.3	Kalmanova filtrace	78
7.3.3.1	Predikce	78
7.3.3.2	Aktualizace	79
8	Digitální snímek	80
8.1	Digitalizace obrazu	80
8.2	Filtry pro úpravu obrazu	81
8.2.1	Filtry zvýrazňující hrany	82
8.2.2	Vyhlažovací filtry	83
8.3	Korelace obrazů	85
8.4	Interest operátor	86
8.5	Snímkové pyramidy	87
9	Ortofotomapa	88
10	Digitální fotogrammetrická stanice	91
10.1	Stereovidění na DFPS	92
10.2	Software moduly DFPS	93
11	Skenovací systémy	94
11.1	Palubní laserové systémy	94
11.2	Pozemní laserové systémy	96
12	Řádkové snímače	98
12.1	Snímač LH SYSTEMS ADS 40	98
12.2	STARIMAGER SI 250	99

13 Závěr	100
14 Seznam použité literatury	101
14.1 Odkazy na další studijní zdroje a prameny	101

1 Úvod

Fotogrammetrie a dálkový průzkum jsou informační technologie pro odvození geometrických, radiometrických a sémantických informací o objektu trojrozměrného světa odvozené z dvourozměrných většinou již digitálních snímků. Digitální snímek je získán digitalizací analogového snímku (filmu) nebo přímo digitální kamerou. Výsledkem zpracování dat jsou tzv. primární produkty (parametry orientace snímků, prostorové souřadnice bodů, digitální model terénu, vektorové informace, ortofotosnímky). Dalším zpracováním mohou být získány sekundární produkty (ortofotomapy, digitální vektorové mapy, perspektivní pohledy, data pro GIS). Letecká fotogrammetrie nachází největší uplatnění při mapování ve středním měřítku a tématickém mapování ve velkém měřítku. Blízká fotogrammetrie zahrnuje převážně netopografické aplikace v širokém spektru oborů. Výhodou fotogrammetrie je, že se jedná o bezkontaktní metodu měření, není nutné být v mapovaném území nebo být v kontaktu s měřeným objektem. Zpracování snímků probíhá v příznivých podmínkách laboratoří, nejsme omezení délkou dne. Nevýhodou je závislost na počasí při snímkování, někdy se čeká i několik týdnů na vhodný den pro snímkování. Laserové skenování se stalo novou progresivní technologií pro sběr dat.

1.1 Cíle

Cílem modulu je naučit studenty základním matematickým vztahům a pojmům ve fotogrammetrii a seznámit je s hlavními technologiemi. S ohledem na velmi dynamický vývoj v této oblasti mohou být některé údaje již během několika měsíců méně aktuální



1.2 Požadované znalosti

Základy geodézie, teorie chyb a vyrovnávacího počtu



1.3 Doba potřebná ke studiu

Definovat dobu pro studium je velmi obtížné, jelikož úroveň studijních schopností studentů je velmi rozdílná. Přibližný odhad je 2 hodiny na jednu kapitolu.



1.4 Klíčová slova

fotogrammetrie, snímek, prvky vnitřní a vnější orientace, relativní a absolutní orientace, blokové vyrovnání, aerotriangulace, interest operátor, korelace, letecká měřická kamera, transformace, kalibrace, přímá orientace, skenování, ortofotomapa.

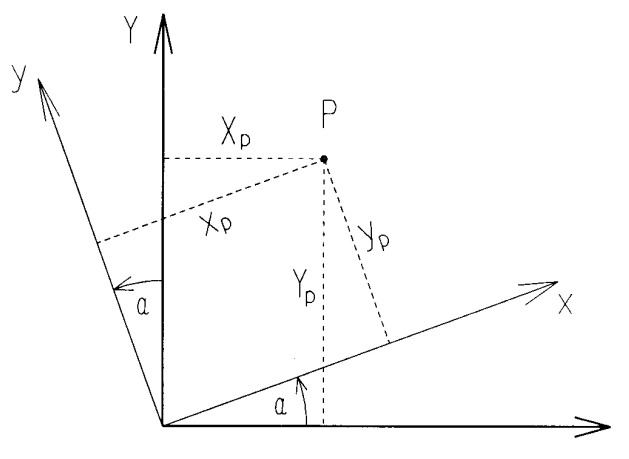


2 Matematické základy fotogrammetrie

Znalost matematických základů je nezbytná pro pochopení fotogrammetrických technik. Pro fotogrammetrii jsou podstatné základy analytické geometrie.

2.1 Rotace v rovině

Mějme dva souřadnicové systémy (mající stejný počátek) pootočené o úhel α . Bod P má v jednom systému souřadnice (x, y) a ve druhém (X, Y) viz obr. 2.1.



Obr. 2.1: Souřadnicové systémy v rovině

Pomocí kosinů úhlů mezi osami lze vyjádřit vztah - transformaci $(x, y) \rightarrow (X, Y)$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(xX) & \cos(yX) \\ \cos(xY) & \cos(yY) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

$$\cos(xX) = \cos \alpha, \quad \cos(xY) = \cos(270 + \alpha),$$

$$\cos(yY) = \cos \alpha, \quad \cos(yX) = \cos(90 + \alpha), \text{ pak}$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

Zavedeme jednotkové vektory $\vec{i} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix}$, $\vec{j} = \begin{bmatrix} -\sin \alpha \\ \cos \alpha \end{bmatrix}$ podél osy x a y.

Dva vzájemně kolmé jednotkové vektory musí splňovat podmínky ortonormality

$$\vec{i}^T \vec{i} = 1 = \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha = r_{11}^2 + r_{12}^2$$

$$\vec{j}^T \vec{j} = 1 = \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = r_{21}^2 + r_{22}^2$$

(1.2)

$$\vec{i}^T \vec{j} = 0 = -\cos \alpha \sin \alpha + \sin \alpha \cos \alpha = r_{11}r_{12} + r_{21}r_{22}$$

Matice R má 4 prvky a musí splňovat 3 podmínky. Jeden parametr (úhel rotace alfa) je nezávislý.

Významným vztahem pro rotační matici je, že $R^{-1} = R^T$. Zpětná transformace $(X, Y) \rightarrow (x, y)$ se provede pomocí inverzní matice rotace.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = R^T \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}$$

2.2 Rotace v prostoru

Rotace v prostoru je definována třemi nezávislými parametry, které ve fotogrammetrii definujeme jako úhly rotací ω, φ, κ kolem tří os x, y, z. Musíme brát ohled na orientaci otáčení (proti směru chodu hodinových ručiček) a pořadí rotací. Primární je pootočení kolem osy x (rotace ω), sekundární je potočení

kolem osy y (rotace φ), terciální je potočení kolem osy z (rotace κ).

$$\begin{aligned} X &= \ddot{x} & \ddot{x} &= \dot{x} \cos \varphi & + \dot{z} \sin \varphi \\ Y &= \ddot{y} \cos \omega - \ddot{z} \sin \omega & \ddot{y} &= & \dot{y} \\ Z &= \ddot{y} \sin \omega + \ddot{z} \cos \omega & \ddot{z} &= -\dot{x} \sin \varphi & + \dot{z} \cos \varphi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{x} &= x \cos \kappa - y \sin \kappa \\ \dot{y} &= x \sin \kappa + y \cos \kappa \\ \dot{z} &= & z \end{aligned}$$

Matice rotace R vznikne součinem tří dílčích matic rotace $R = R_\omega R_\varphi R_\kappa$

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

$$R_\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix}$$

$$R_\kappa = \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_\varphi = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix}$$

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

Souřadnice z jednoho systému převedeme do druhého pomocí rotační matice R .

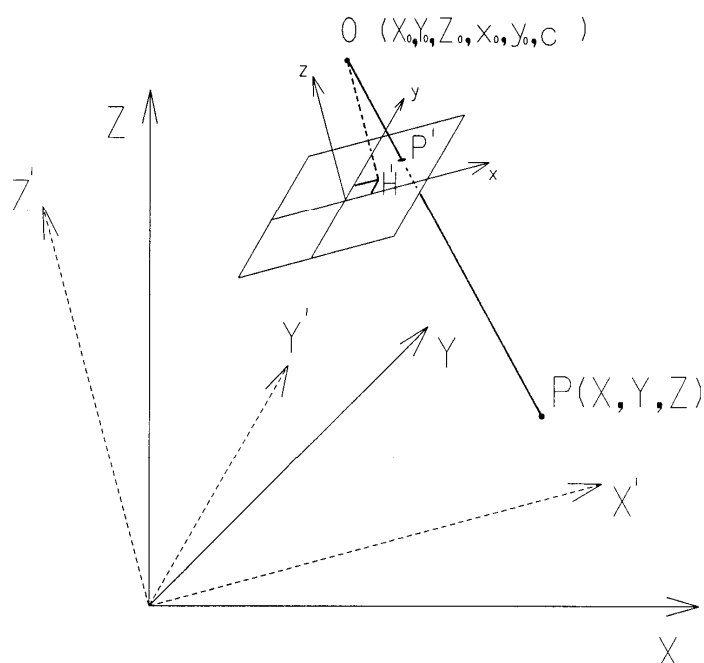
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R^T \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

Stejně jako v rovině musí být i v prostoru splněno šest podmínek ortogonality.

$$i^T i = j^T j = k^T k = 1 \quad i^T j = j^T k = k^T i = 0$$

2.3 Centrální projekce v prostoru

Snímky pro fotogrametrické účely můžeme považovat s určitou přesností za centrální projekci prostorových objektů. Vztah mezi snímkovými (x,y,z) a objektovými souřadnicemi bodu (X,Y,Z) vyjadřuje podmínka kolinearity, tj. že bod na objektu, jemu odpovídající snímkový bod a projekční centrum leží na přímce. Vztah mezi použitými souřadnicovými systémy je zřejmý z obr. 1.2. Systém (X',Y',Z') má osy rovnoběžné se systémem (x,y,z) .



Obr. 2.2: Vztah mezi snímkovými a pobjektovými souřadnicemi

Podmínku kolinearit vyjadřují rovnice

$$\frac{x - x_0}{z - z_0} = \frac{X' - X'_0}{Z' - Z'_0} \quad \frac{y - y_0}{z - z_0} = \frac{Y' - Y'_0}{Z' - Z'_0}$$

Souřadnice pootočeného systému (X', Y', Z') nahradíme souřadnicemi původního systému

$$\begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X' - X'_0 \\ Y' - Y'_0 \\ Z' - Z'_0 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Matice rotace \mathbf{R} vznikne součinem tří dílčích matic rotace $\mathbf{R} = \mathbf{R}_\omega \mathbf{R}_\varphi \mathbf{R}_\kappa$

Vynásobíme rovnici (2.1) maticí \mathbf{R}^T

$$r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0) = (X' - X'_0)$$

$$r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0) = (Y' - Y'_0)$$

$$r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0) = (Z' - Z'_0)$$

po dosazení těchto rovnic do podmínky kolinearity a uvažíme-li, že $z = 0$, $z_0 = c$ dostaneme po úpravě **zobrazovací rovnice centrální projekce**

$$\begin{aligned} x &= x_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ y &= y_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Prvky vnitřní orientace x_0, y_0, c nám definují polohu projekčního centra ve snímkovém souřadnicovém systému. **Prvky vnější orientace** $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$ nám definují polohu a pootočení kamery (snímkového systému) v objektovém souřadnicovém systému. Pomocí snímkových souřadnic a prvků vnitřní orientace jsme schopni rekonstruovat trs paprsků vycházejících z projekčního centra a tento trs pomocí prvků vnější orientace orientujeme v objektovém systému.

Rovnice (2.1.) lze napsat i ve tvaru

$$\begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X' - X'_0 \\ Y' - Y'_0 \\ Z' - Z'_0 \end{bmatrix} = m \mathbf{R} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix},$$

kde m je měřítkový koeficient.

Po úpravě získáme rovnice pro objektové souřadnice X a Y

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) - r_{13}c}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) - r_{33}c} \quad (2.3)$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) - r_{23}c}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) - r_{33}c}$$

Tyto rovnice říkají, že **není možné rekonstruovat prostorový objekt z jednoho snímku**, protože pro každý snímkový bod existuje nekonečné množství řešení (z dvou měřených hodnot není možné vypočítat 3 neznámé souřadnice). Potřebujeme nejméně ještě jeden snímek nebo doplňkovou informaci o souřadnici Z . Rovnice (2.2) je možné přepsat na následující tvar, který je používán v přímé lineární transformaci.

$$x = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad y = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad (2.4)$$

2.4 Centrální projekce v rovině

Rovnice (2.3) lze upravit na tvar

$$X = \frac{\bar{a}_1 x + \bar{a}_2 y + \bar{a}_3}{\bar{c}_1 x + \bar{c}_2 y + \bar{c}_3}, \quad Y = \frac{\bar{b}_1 x + \bar{b}_2 y + \bar{b}_3}{\bar{c}_1 x + \bar{c}_2 y + \bar{c}_3}.$$

Podělením hodnotou \bar{c}_3 dostaneme vztah mezi snímkovými souřadnicemi x, y a objektovými souřadnicemi X, Y .

$$X = \frac{a_1 x + a_2 y + a_3}{c_1 x + c_2 y + 1}, \quad Y = \frac{b_1 x + b_2 y + b_3}{c_1 x + c_2 y + 1}. \quad (2.5)$$

Z rovnic vidíme, že z jednoho snímku můžeme rekonstruovat jen rovinný objekt. Centrální projekci rovinného objektu popisuje 8 nezávislých parametrů. Rovnice (2.5) popisují kolineární vztah dvou rovin.

2.5 Rovinné transformace

Ve fotogrammetrii používáme různé druhy rovinných transformací: shodnostní, podobnostní, afinní, kolineární, bilineární a polynomickou. Tyto transformace nacházejí široké uplatnění nejen ve fotogrammetrii při zpracování dat, zejména při práci s rastrovými obrazy.

Shodnostní transformace má 3 parametry (úhel pootočení, dva posuny).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} tx \\ ty \end{bmatrix}$$

Používá se jen v případech, kdy nechceme provést žádné měřítkové změny v měřených snímkových souřadnicích (např. při použití neměřických kamer v blízké fotogrammetrii, když za rámové značky používáme rohy snímku).

Podobnostní transformace má 4 parametry (úhel pootočení, dva posuny a měřítkový koeficient). Používá se v případech, kdy chceme provést měřítkovou změnu v měřených snímkových souřadnicích, ale jsou důvody proč nepoužít afinní transformaci. Podobnostní a shodnostní transformace nacházejí uplatnění zejména v geodetických aplikacích.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q \cos \alpha & -q \sin \alpha \\ q \sin \alpha & q \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} tx \\ ty \end{bmatrix}$$

Afinní transformace je nejčastěji používaná transformace pro převod naměřených snímkových souřadnic \bar{x}, \bar{y} (přístrojových souřadnic) do pravých snímkových souřadnic x, y . Afinní transformace má 6 parametrů (úhel pootočení, dva posuny, dva měřítkové koeficienty a parametr - úhel popisující kosost -nekolmost os).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_x \cos \alpha & -q_y \sin(\alpha + \delta\alpha) \\ q_x \sin \alpha & q_y \cos(\alpha + \delta\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} tx \\ ty \end{bmatrix}$$

nebo jednodušeji

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{13} \\ a_{23} \end{bmatrix}$$

Rotační matice tvořená koeficienty a_{ij} pro $i, j = 1, 2$ nesplňuje podmínky ortogonalit a dovoluje různé měřítko v jednotlivých osách a libovolný úhel mezi osami. Umožňuje tak odstranit možné chyby vzniklé deformací filmu nebo přístrojové chyby. Parametry $q_y, q_x, \delta\alpha, \alpha$ je možné vypočítat z koeficientů a_{ij} .

$$q_x = \sqrt{a_{11}^2 + a_{21}^2}, \quad q_y = \sqrt{a_{12}^2 + a_{22}^2}, \quad \operatorname{tg} \alpha = a_{21} / a_{11}, \quad \operatorname{tg}(\alpha + \delta\alpha) = -a_{12} / a_{22}.$$

Kolineární transformace je používána transformaci snímku do roviny X,Y. Má 8 parametrů, nezachovává dělicí poměr jako předchozí transformace, nýbrž jen dvojpoměr. V odůvodněných případech je ji možné použít pro transformaci měřených snímkových souřadnic u kamer mající mřížku v rovině snímku (reseau) do systému mřížky. Rovnice mají tvar

$$X = \frac{a_1 x + a_2 y + a_3}{c_1 x + c_2 y + 1}, \quad Y = \frac{b_1 x + b_2 y + b_3}{c_1 x + c_2 y + 1}.$$

Bilineární transformace byla používána u kamer firmy Wild, které měly rámové značky v rozích snímku, v současnosti nachází uplatnění pro výpočet hodnot intenzity v digitálně upravovaném snímku.

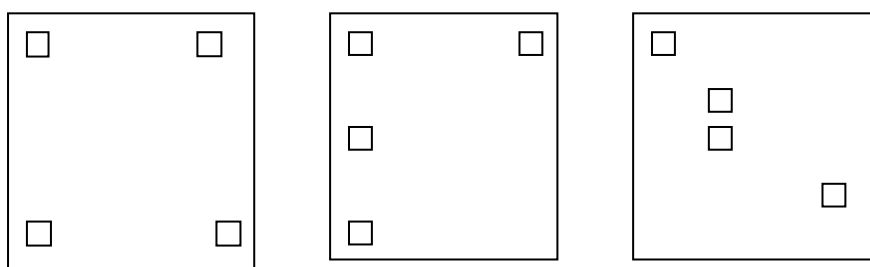
$$x = a_1 + a_2 \bar{x} + a_3 \bar{y} + a_4 \bar{x}\bar{y} \quad y = b_1 + b_2 \bar{x} + b_3 \bar{y} + b_4 \bar{x}\bar{y}$$

Polynomická transformace se dříve používala pro odstranění vlivu systematických chyb v řadové aerotriangulaci používající jako základní jednotku model. Uplatnění má v kartografii a dálkovém průzkumu při odstranění deformací obrazu.

$$\begin{aligned} x &= a_1 + a_2 \bar{x} + a_3 \bar{y} + a_4 \bar{x}^2 + a_5 \bar{y}^2 + a_6 \bar{x}\bar{y} \\ y &= b_1 + b_2 \bar{x} + b_3 \bar{y} + b_4 \bar{x}^2 + b_5 \bar{y}^2 + b_6 \bar{x}\bar{y} \end{aligned}$$

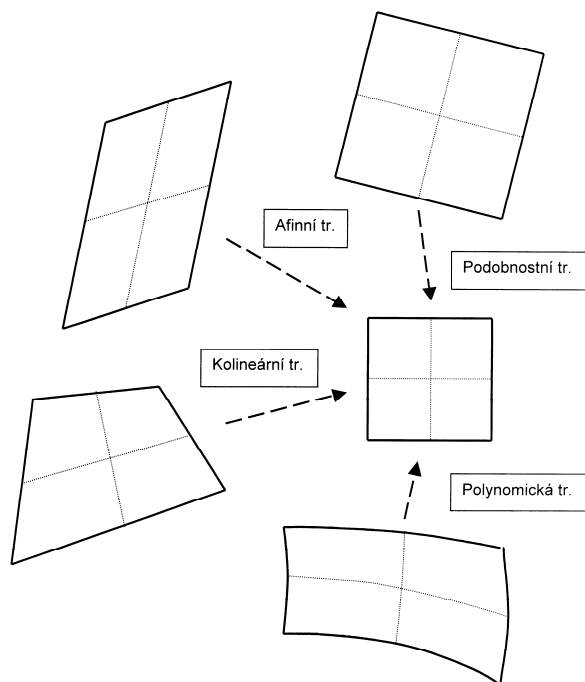
Pro všechny druhy transformací platí, že je potřeba mít, pro dosažení spolehlivých výsledků, dobře rozložené identické body sloužící pro výpočet transformačních koeficientů. Body musí obklopovat oblast, kde budeme provádět transformaci, což v případě rámových značek na snímku je zajištěno.

U polynomicke transformace je nutné, aby body byly rovnoměrně rozmístěny po celé oblasti. Čím je větší počet transformačních parametrů, tím je vhodnější mít více nadbytečných identických bodů. Minimální počet identických bodů pro výpočet transformačních koeficientů je dán počtem parametrů dělených dvěma. Každý identický bod má dvě souřadnice a proto poskytne dvě rovnice. Pro podobnostní a shodnostní transformaci je nutné mít min. 2 identické body, pro afinní transformaci min. 3 identické body, pro kolineární a bilineární transformaci min. 4 identické body, pro polynomicou transformaci 2. stupně min. 6 identických bodů. Na obr. 1.3 jsou uvedeny příklady rozložení identických bodů. Vlevo je ideální rozložení identických bodů, uprostřed je rozložení přijatelné pro podobnostní transformaci, ale v případě chyby v souřadnici pravého horního bodu ji v případě použití afinní transformace neodhalíme, protože zůstane chyba skrytá v měřítkovém koeficientu. Rozložení identických bodů na obrázku vpravo je zcela nepřijatelné.



Obr.2.3: Rozložení identických bodů pro transformaci

Na obr. 2.4 je geometrické znázornění obrazů ovlivněných různými fyzikálními vlivy, takže nejsou shodné s původním obrazem. Příslušnou transformací je možné deformovaný obraz přetransformovat na požadovaný tvar.



Obr.2.4: Transformace – geometrický vliv

2.6 Robustní vyrovnání

V každém větším souboru měření s vyskytují hrubé a systematické chyby, které postihují 0,1 – 2% měření. Některé můžeme snadno identifikovat a odstranit, ale vyskytují se i chyby, jejichž původ neznáme a mohou ovlivnit výsledky vyrovnání. Metoda nejmenších čtverců (MNČ) je všeobecně používanou metodou. Dobré výsledky poskytuje za předpokladu, že měřené veličiny obsahují jen chyby náhodného charakteru. V případě výskytu hrubých a systematických chyb nelze tyto chyby pomocí oprav jednoznačně identifikovat. Pro nalezení tzv. odlehlých měření, tj. měření zatížených hrubou nebo systematickou chybou jsou nejčastěji používány dva postupy.

První se nazývá „data snooping“ a k vyhledání odlehlých měření používá normovaných oprav. U MNČ mají rovnice oprav u vyrovnání zprostředkujících měření tvar $\mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{l}$, za podmínky $\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} = \min$. je vyrovnaný (odhadnutý) vektor neznámých $\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}$. Dosadíme-li tento výraz do rovnic oprav obdržíme $\mathbf{v} = \mathbf{A}(\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} - \mathbf{l} = (-\mathbf{A}(\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T + \mathbf{P}^{-1}) \mathbf{P} \mathbf{l} = -\mathbf{Q}_{vv} \mathbf{P} \mathbf{l}$.

Pro stanovení možného výskytu odlehlého měření použijeme normovanou opravu w mající normální rozdělení $N(0,1)$

$$w = \frac{\left| v_i \sqrt{p_i} \right|}{\sigma_0 \sqrt{r_i}}, \text{ kde } p_i \text{ je váha měření, } \sigma_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{m - n},$$

r_i je diagonální člen matice $(\mathbf{Q}_{vv} \mathbf{P})$.

Platí $\sum r_i = m - n = r = \text{počet nadbytečných měření}$.

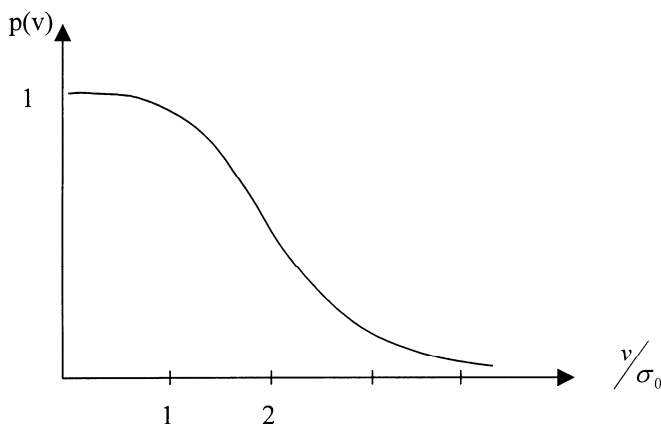
Nevýhody metody „data snooping“ jsou:

- 1) střední jednotková chyba σ_0 je ovlivněna odlehlými měřeními,
- 2) váha měření musí být známa přesněji, než je potřeba pro vyrovnání,
- 3) opravy jsou korelované a hrubé chyby mají vliv i na jiná měření,
- 4) výpočet je potřeba opakovat.

Nedostatky MNČ vedly statistiky ke hledání metod, které jsou odolnější (robustnější) vůči odlehlým měřením. Experimenty prokázaly, že robustní odhady dávají lepší výsledky než MNČ. Většina robustních vyrovnání používaných v geodézii upravuje existující MNČ tak, aby byla robustní. Při robustní MNČ se váha měření mění v každé iteraci pomocí váhové funkce $p(v_i)$. Často se používají exponenciální funkce - viz obr. 2.5. Tzv. dánská metoda používá váhovou funkci

$$p(v_i) = -0,05 \left(\frac{\left| v_i \sqrt{p_i} \right|}{\sigma_0} \right)^d, \text{ kde } d = 4,4 \text{ (3,0) pro 2. (3.- } n \text{) iteraci. Odlehlá měření}$$

postupně získají větší opravu a tím menší váhu a tím se jejich vliv eliminuje. Po vyloučení identifikovaných měření se vyrovnání provede s původními vahami.



Obr.2.5 Váhová funkce

3 Určení orientace a polohy bodu ze dvou snímků

V letecké fotogrammetrii vyhodnocuje obvykle dva snímky pořízené měřickou kamerou s 60 % podélným překrytem, mající osy záběru přibližně svislé. Taková stereodvojice je pozorována ve vyhodnocovacím přístroji nebo monitoru digitální fotogrammetrické stanice. Vyhodnocení může být prováděno numericky s použitím měřených snímkových souřadnic v analytickém plotru nebo v digitální fotogrammetrické stanici, anebo pomocí opticko-mechanických analogových přístrojů. Analogové přístroje jsou v současné době již minimálně používány, pokud ano, tak jsou velmi často přestavěny na analytické přístroje. Postupy na analogových přístrojích jsou bohatě popsány ve starší literatuře a nebudou zde již popisovány. Vyhodnocovatel získá stereoskopický vjem a vidí prostorový stereomodel fotografovaného objektu. Pro získání stereo-vjemu je nutné, aby snímky byly orientovány. Buď známe prvky vnější orientace nebo je musíme určit, anebo musíme znát prvky relativní a absolutní orientace nebo je musíme určit.

3.1 Určení polohy bodu když prvky vnější orientace jsou známy

Na snímcích jsou změřeny snímkové souřadnice a prostorové souřadnice objektu získáme z rovnic

$$X = X_{01} + (Z - Z_{01}) \frac{r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) + r_{13}c}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}c} = X_{01} + (Z - Z_{01})k_{x1}$$

$$Y = Y_{01} + (Z - Z_{01}) \frac{r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) + r_{23}c}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}c} = Y_{01} + (Z - Z_{01})k_{z1}$$

pro první snímek a

$$X = X_{02} + (Z - Z_{02}) \frac{r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) + r_{13}c}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}c} = X_{02} + (Z - Z_{02})k_{x2}$$

$$Y = Y_{02} + (Z - Z_{02}) \frac{r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) + r_{23}c}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}c} = Y_{02} + (Z - Z_{02})k_{z2}$$

pro druhý snímek.

Porovnáním první a třetí rovnice dostaneme

$$X_{01} + (Z - Z_{01})k_{x1} = X_{02} + (Z - Z_{02})k_{x2} \quad \text{a získáme tak souřadnici } Z$$

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

Pro výpočet X, Y se použijí rovnice pro první snímek.

3.2 Prvky vnější orientace snímku nejsou známy

V případě, že neznáme-li prvky vnější orientace, je možné požit některý ze tří způsobů orientace:

- prvky vnější orientace určíme samostatně pro každý snímek,
- prvky vnější orientace určíme společně pro oba snímky,
- snímky jsou nejprve vzájemně orientovány (relativní orientace) pro vytvoření prostorového modelu ve zvoleném x,y,z souřadnicovém systému, který je pak transformován do X,Y,Z objektového systému (absolutní orientace).

3.2.1 Určení prvků vnější orientace samostatně pro každý snímek

V tomto případě potřebuje nejméně tři vlíčovací body na každém snímku, jejichž snímkové souřadnice změříme pro určení šesti prvků vnější orientace. Pro každý vlíčovací bod můžeme napsat dvě rovnice pro snímkové souřadnice.

Prvky vnější orientace můžeme určit vyrovnáním. Linearizací zobrazovacích rovnic centrální projekce získáme rovnice oprav (pro bod i a snímek j)

$$v_{xij} = a_1 dX_{0j} + a_2 dY_{0j} + a_3 dZ_{0j} + a_4 d\omega_j + a_5 d\varphi_j + a_6 d\kappa_j - (x_{ij}^m - x_{ij}^0)$$

$$v_{yij} = b_1 dX_{0j} + b_2 dY_{0j} + b_3 dZ_{0j} + b_4 d\omega_j + b_5 d\varphi_j + b_6 d\kappa_j - (y_{ij}^m - y_{ij}^0)$$

Jednotlivé koeficienty a_i , b_i získáme jako parciální derivací funkcí F a G

$$x = x_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = F(x)$$

$$y = y_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = G(y)$$

$$a_1 = \frac{\partial F}{\partial X_0} \quad b_1 = \frac{\partial G}{\partial Y_0} \text{ atd.}$$

x_{ij}^m, y_{ij}^m jsou měřené snímkové souřadnice,

x_{ij}^0, y_{ij}^0 jsou snímkové souřadnice vypočtené z přibližných hodnot (předchozí iterace)

$$x^0 = x_0 - c \frac{r_{11}^0(X - X_0^0) + r_{21}^0(Y - Y_0^0) + r_{31}^0(Z - Z_0^0)}{r_{13}^0(X - X_0^0) + r_{23}^0(Y - Y_0^0) + r_{33}^0(Z - Z_0^0)}$$

$$y^0 = y_0 - c \frac{r_{12}^0(X - X_0^0) + r_{22}^0(Y - Y_0^0) + r_{32}^0(Z - Z_0^0)}{r_{13}^0(X - X_0^0) + r_{23}^0(Y - Y_0^0) + r_{33}^0(Z - Z_0^0)}$$

V maticovém zápisu mají rovnice oprav tvar $\mathbf{v} = \mathbf{A} \, d\mathbf{x} - \mathbf{l}$. Za podmínky $\sum \mathbf{v}^T \mathbf{v} = \min$. získáme normální rovnice

$$\mathbf{0} = \mathbf{A}^T \mathbf{A} \, d\mathbf{x} - \mathbf{A}^T \mathbf{l}$$

Vypočtené neznámé $d\mathbf{x}$ ($dX_0, dY_0, dZ_0, d\omega, d\varphi, d\kappa$) připočteme k přibližným hodnotám prvků orientace. Výpočet se opakuje do splnění kritérií pro ukončení iterací (např. hodnota $\sum \mathbf{v}^T \mathbf{v}$ v i -té iteraci se liší od předchozí iterace jen o určitou malou hodnotu). Tento postup se nazývá někdy prostorové protínání zpět (spatial resection). Nevýhodou tohoto postupu je, že nezískáme žádnou informaci o tom, zda odpovídající si (homologické) paprsky se protnou v objektovém bodě. Je možné použít jen úplné vlíčovací body. Tyto nevýhody odstraňuje následující postup.

3.2.2 Určení prvků vnější orientace společně pro oba snímky

V tomto případě měříme snímkové souřadnice vlíčovacích bodů a několik nových bodů, jejichž objektové souřadnice neznáme. Pro každý úplný vlíčovací bod máme 4 rovnice

$$x_1 = f(X_{01}, Y_{01}, Z_{01}, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1)$$

$$y_1 = f(X_{01}, Y_{01}, Z_{01}, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1)$$

$$x_2 = f(X_{02}, Y_{02}, Z_{02}, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2)$$

$$y_2 = f(X_{02}, Y_{02}, Z_{02}, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2)$$

a pro každý nově určovaný bod rovněž čtyři rovnice, s dalšími třemi neznámými (X, Y, Z).

$$x_1 = f(X_{01}, Y_{01}, Z_{01}, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1, X, Y, Z)$$

$$y_1 = f(X_{01}, Y_{01}, Z_{01}, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1, X, Y, Z)$$

$$x_2 = f(X_{02}, Y_{02}, Z_{02}, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2, X, Y, Z)$$

$$y_2 = f(X_{02}, Y_{02}, Z_{02}, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2, X, Y, Z)$$

Získáme tak systém s velkým počtem nadbytečných rovnic. Vyrovnáním metodou nejmenších čtverců obdržíme neznámé prvky vnější orientace a souřadnice nových bodů. Tento postup je nejpřesnější z uvedených metod. Je možné rovněž použít i neúplné vlíčovací body, řešení je možné i v případě, kdy máme alespoň dva vlíčovací body s rovinnými souřadnicemi (X, Y) a tři vlíčovací body s výškami (souřadnice Z).

Například mějme jeden úplný vlíčovací bod, 2 neúplné vlíčovací body (známe jen X, Y), 2 neúplné vlíčovací body (známe jen Z) a pět nových bodů, jejichž souřadnice neznáme. Počet neznámých je: $(2 * 6)$ prvků vnější orientace a $(5 * 3)$ souřadnic nových bodů a $(2 * 1) + (2 * 2)$ neznámých souřadnic vlíčovacích bodů, tj. celkem 31 neznámých. Počet měření je $(10 \text{ bodů} * 4 \text{ rovnice}) = 40$.



3.2.3 Společná orientace dvou snímků pomocí relativní a absolutní orientace

Orientace je prováděna ve dvou krocích. Nejprve se vytvoří stereomodel a ten je transformován do objektového souřadnicového systému. Vztah mezi modelovými souřadnicemi x_m, y_m, z_m a objektovými souřadnicemi X, Y, Z vyjadřuje rovnice, která představuje podobnostní prostorovou transformaci

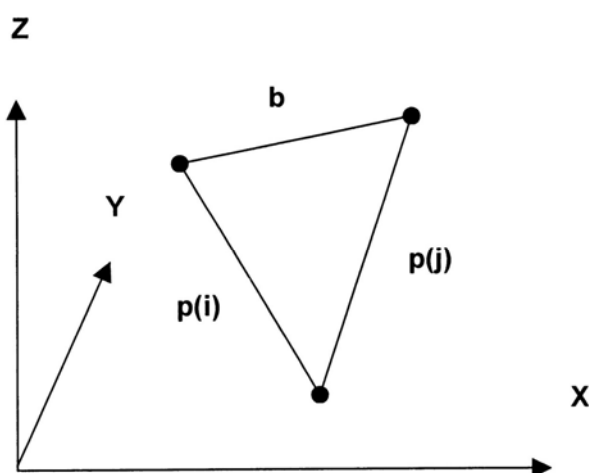
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} + m R \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix}$$

kde R je matice rotace modelového systému do objektového systému odvozená ze tří rotací Ω, Φ, K ,

X_p, Y_p, Z_p jsou objektové souřadnice počátku modelového systému a

m je měřítkové číslo modelového systému.

Sedm parametrů $X_p, Y_p, Z_p, \Omega, \Phi, K, m$ je nazýváno prvky **absolutní orientace**. Nejméně 7 rovnic je požadováno pro výpočet těchto prvků. Tři rovnice poskytne úplný vlícovací bod, dvě rovnice rovinné vlícovací bod a jednu rovnici výškový vlícovací bod. Absolutní orientace proto vyžaduje dva úplné a jeden výškový vlícovací bod (nesmí ležet na přímce) nebo dva rovinné a tři výškové vlícovací body (nesmí ležet na přímce). Pro orientaci dvou snímků v prostoru potřebujeme znát 12 prvků vnější orientace. Jestliže absolutní orientace vyžaduje určení sedmi prvků, zbývajících pět musí být určeno v prvním kroku tj. v relativní orientaci. Model je ustanoven jestliže se odpovídající (homologické) paprsky protnou alespoň v pěti dobře rozmístěných bodech. Je-li tohoto stavu dosaženo, protnou se i ostatní paprsky. Postup pro dosažení tohoto stavu se nazývá **relativní orientace**, protože je určena jen vzájemná (relativní orientace) paprskových trsů bez vztahu k objektovému souřadnicovému systému. Proto relativní orientace nevyžaduje žádné vlícovací body. Relativní a absolutní orientaci je možné provádět na analogových přístrojích. Relativní orientace může být vyjádřena skalárním součinem tří vektorů b, p_1, p_2 , $(b, p_{1i}, p_{2i}) = 0 \quad i = 1, \dots, 5$ viz obr. 3.1. Tento vztah nazýváme **podmínkou koplanarity**.



Obr. 3.1: Podmínka koplanarity

3.2.3.1 Relativní orientace

Předpokládejme přibližně vertikální snímky. Vztah mezi snímkovými souřadnicemi a modelovými souřadnicemi je dán již známými rovnicemi (3.1), kde místo objektových souřadnic zavedeme modelové souřadnice

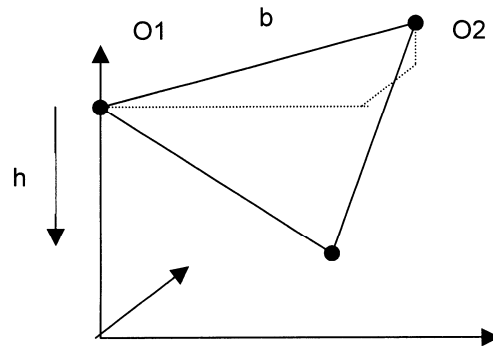
$$x_m = x_{m0} + (z_m - z_{m0}) \frac{r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) + r_{13}c}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}c}$$

$$y_m = y_{m0} + (z - z_{m0}) \frac{r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) + r_{23}c}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}c}$$

pro první snímek a podobně pro druhý snímek. Zavedeme místo konečných prvků diferenciální hodnoty, pak

$$\omega = d\omega, \varphi = d\varphi, \kappa = d\kappa, x_{m02} = b_x, y_{m02} = b_y, z_{m02} = z_{m01} + b_z, h = z_{m01} - z_m,$$

$x_0 = y_0 = x_{m01} = y_{m01} = 0$. Označení je zřejmé z obr. 3.2.



Obr. 3.2: Souřadnicový systém modelových souřadnic

Prostorová rotační matice \mathbf{R} se zjednoduší pro diferenciální rotace na tvar

$$dR = \begin{bmatrix} 1 & -\kappa d & d\varphi \\ d\kappa & 1 & -d\omega \\ -d\varphi & d\omega & 1 \end{bmatrix}$$

Pro první snímek se rovnice pro modelové souřadnice změní na tvar

$$x_m = (-h) \frac{x - yd\kappa - cd\varphi}{-xd\varphi + yd\omega - c}, \quad y_m = (-h) \frac{xd\kappa + y - cd\omega}{-xd\varphi + yd\omega - c}$$

Rovnici pro souřadnici y podělíme hodnotou c

$$y_m = (-h) \frac{xd\kappa/c + y/c - d\omega}{-xd\varphi/c + yd\omega/c - 1}$$

a použitím řady za podíl $1/(-1+x) = -1 - x + x^2 \dots$ a zanedbáním členů druhého a vyššího řádu obdržíme pro první snímek

$$y_{1m} = (-h) \left(-\frac{x_1}{c} d\kappa_1 - \frac{y_1}{c} - \frac{y_1^2}{c^2} d\omega_1 + \frac{x_1 y_1}{c^2} d\varphi_1 - d\omega_1 \right)$$

zavedením modelové souřadnice h místo z se rovnice změní na tvar

$$y_{1m} = h \left(\frac{x_1}{c} d\kappa_1 + \frac{y_1}{c} + \left(1 + \frac{y_1^2}{c^2} \right) d\omega_1 - \frac{x_1 y_1}{c^2} d\varphi_1 \right)$$

a podobně pro druhý snímek

$$y_{2m} = db_y + (h + db_z) \left(\frac{x_2}{c} d\kappa_2 + \frac{y_2}{c} + \left(1 + \frac{y_2^2}{c^2} \right) d\omega_2 - \frac{x_2 y_2}{c^2} d\varphi_2 \right)$$

a při zanedbání členů druhého řádu dostaneme

$$y_{2m} = db_y + \frac{y_2}{c} db_z + h \left(\frac{x_2}{c} d\kappa_2 + \frac{y_2}{c} + \left(1 + \frac{y_2^2}{c^2} \right) d\omega_2 - \frac{x_2 y_2}{c^2} d\varphi_2 \right)$$

Pro přibližně svislé snímky je podmínka protnutí paprsků splněna jestliže $y_{1m} = y_{2m}$, pak

$$0 = h \left(\frac{x_2}{c} d\kappa_2 - \frac{x_1}{c} d\kappa_1 + \frac{y_2 - y_1}{c} + \left(1 + \frac{y_2^2}{c^2} \right) d\omega_2 \right) - \\ h \left(1 + \frac{y_1^2}{c^2} \right) d\omega_1 - \frac{x_2 y_2}{c^2} d\varphi_2 + \frac{x_1 y_1}{c^2} d\varphi_1 + db_y + \frac{y_2}{c} db_z$$

zavedeme-li vertikální paralaxu $p_y = y_2 - y_1$, pak obdržíme

$$p_y = x_2 d\kappa_2 - x_1 d\kappa_1 + \left(c + \frac{y_2^2}{c} \right) d\omega_2 - \left(c + \frac{y_1^2}{c} \right) d\omega_1 - \frac{x_2 y_2}{c} d\varphi_2 + \\ + \frac{x_1 y_1}{c} d\varphi_1 + \frac{c}{h} db_y + \frac{y_2}{h} db_z$$

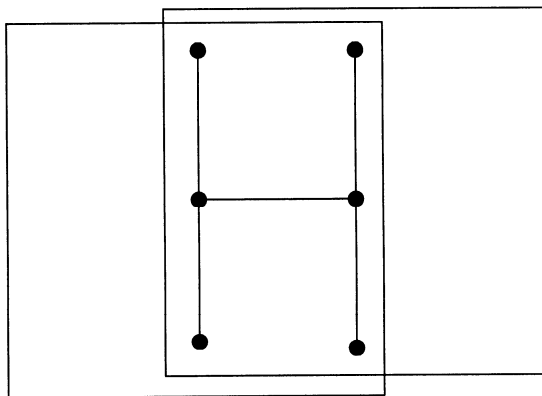
Tato rovnice platí pro přibližně svislé snímky říká, že vertikální paralaxy vznikají z osmi orientačních prvků $d\kappa_2, d\kappa_1, d\omega_2, d\omega_1, d\varphi_2, d\varphi_1, db_y, db_z$. Složka b_x nemá v první aproximaci vliv na vertikální paralaxu. Jelikož relativní orientace může být dosažena pomocí pěti nezávislých prvků, tři z osmi musí být rovny nule. Z praktického hlediska jsou používány dva postupy. Postup nazývaný **nezávislá dvojice** používá jen rotace, kdy snímky se otáčejí, ale nemění polohu

$$p_y = x_2 d\kappa_2 - x_1 d\kappa_1 - \frac{x_2 y_2}{c} d\varphi_2 + \frac{x_1 y_1}{c} d\varphi_1 + \left(c + \frac{y_2^2}{c} \right) d\omega_2.$$

Druhý postup **připojení snímku** nechává první snímek fixní a otáčí a posunuje druhý snímek

$$p_y = x_2 d\kappa_2 + \left(c + \frac{y_2^2}{c} \right) d\omega_2 - \frac{x_2 y_2}{c} d\varphi_2 + \frac{c}{h} db_y + \frac{y_2}{h} db_z$$

Výše uvedené rovnice mohou být přepsány do tvaru rovnic oprav a potřebné orientační prvky jsou vypočteny metodou nejmenších čtverců. Spolehlivý výsledek obdržíme v případě, kdy měřené body jsou rovnoměrně rozmístěny po modelu. Optimální rozložení bodů je podle schématu, jak se používalo při orientaci na analogových přístrojích (tzv. Gruberovy body) obr.3.3.



Obr. 3.3: Gruberovo rozložení bodů pro relativní orientaci

3.2.3.2 Deformace modelu

Relativní orientace je vždy provedena s určitou přesností. Zbytkové chyby ovlivňují stereomodel, který je deformován nejvíce v souřadnici z. Výška (souřadnice z) je funkcí horizontální paralaxy. Stejným postupem jako pro vertikální paralaxu obdržíme rovnici pro horizontální paralaxu

$$p_x = x_{1m} - x_{2m} = \frac{h}{c} x_1 - \left(h + \frac{hx_1^2}{c^2} \right) d\varphi_1 + \frac{hx_1 y_1}{c^2} d\omega_1 - \frac{hy_1}{c} d\kappa_1 - b_x$$

$$- \frac{h}{c} x_2 - \left(h + \frac{hx_2^2}{c^2} \right) d\varphi_2 + \frac{hx_2 y_2}{c^2} d\omega_2 - \frac{hy_2}{c} d\kappa_2 - \frac{x_2}{c} db_z$$

Snímkové souřadnice nahradíme modelovými. Pro přibližně svislé snímky stačí pro stanovení deformací použít následující jednoduché vztahy

$$y_m \approx \frac{h}{c} y_1 \approx \frac{h}{c} y_2, \quad x_m \approx \frac{h}{c} x_1 \approx \frac{h}{c} x_2 + b$$

a nahrazením $\frac{h}{c} x_1 - \frac{h}{c} x_2 - b_x = -db_x$ máme

$$p_x = -db_x - \frac{x_m - b}{h} db_z - h(1 + \frac{x_m^2}{h^2}) d\varphi_1 - \frac{x_m y_m}{h} d\omega_1 + y_m d\kappa_1$$

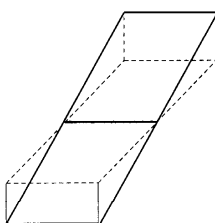
$$+ h(1 + \frac{(x_m - b)^2}{h^2}) d\varphi_2 - \frac{(x_m - b) y_m}{h} d\omega_2 + y_m \kappa_2$$

Chybu ve výšce modelu vyjádříme vztahem $dz = \frac{h}{b} p_x$. Dosazením za p_x dostaneme

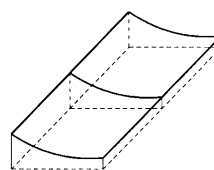
$$dz = -\frac{h}{b} db_x - \frac{x_m - b}{b} db_z - (\frac{h^2}{b} + \frac{x_m^2}{b^2}) d\varphi_1 - \frac{x_m y_m}{b} d\omega_1 + \frac{h y_m}{b} d\kappa_1$$

$$+ (\frac{h^2}{b} + \frac{(x_m - b)^2}{b^2}) d\varphi_2 - \frac{(x_m - b) y_m}{b} d\omega_2 + \frac{h y_m}{b} \kappa_2$$

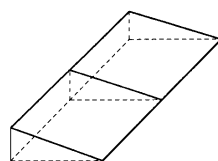
$d\kappa_2$



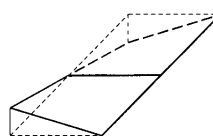
$d\varphi_2$



db_z



$d\omega_2$



Obr. 3.4: Vliv orientační prvků na deformaci modelu

Vliv jednotlivých členů výše uvedené rovnice je ukázán na obr.3.4.

3.2.4 Absolutní orientace

Vztah mezi modelovými a objektovými souřadnicemi je vyjádřen následující rovnicí.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} + m R \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix}$$

Rovnice musí být linearizována (v matici R nejsou vztahy mezi rotacemi lineární). Jelikož diferenční úhly rotací jsou malé, je nutné nejprve model přibližně pootočit, posunout a zvětšit tak, aby se modelové souřadnice příliš nelišily od objektových souřadnic. V případě leteckých snímků hodnoty pro předběžnou transformaci získáme jednoduše z modelových a objektových souřadnic vlíčovacích bodů. Modelové souřadnice po předběžné transformaci označme U, V, W .

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ w_p \end{bmatrix} + \bar{m} \begin{bmatrix} \cos \bar{K} & -\sin \bar{K} & 0 \\ \sin \bar{K} & \cos \bar{K} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix}$$

Linearizovaná matice R má tvar dR a pro měřítko použijeme výraz $m = 1 + dm$.

$$dR = \begin{bmatrix} 1 & -dK & d\Phi \\ dK & 1 & -d\Omega \\ -d\Phi & d\Omega & 1 \end{bmatrix}, \text{ pak}$$

$$mdR = (1 + dm)dR = \begin{bmatrix} 1 + dm & -dK & d\Phi \\ dK & 1 + dm & -d\Omega \\ -d\Phi & d\Omega & 1 + dm \end{bmatrix} = I + \begin{bmatrix} dm & -dK & d\Phi \\ dK & dm & -d\Omega \\ -d\Phi & d\Omega & dm \end{bmatrix}$$

Linearizovaná rovnice prostorové podobnostní transformace je

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dX_p \\ dY_p \\ dZ_p \end{bmatrix} + (1 + dm)dR \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix}$$

a rovnice oprav mají tvar

$$\begin{aligned} v_X &= dX_p + Udm + W d\Phi - V dK - (X - U) \\ v_Y &= dY_p + Vdm - W d\Omega + U dK - (Y - V) \\ v_Z &= dZ_p + Wdm + V d\Omega - U d\Phi - (Z - W) \end{aligned}$$

Úplný vlíčovací bod poskytne tři rovnice, rovinný vlíčovací bod poskytne první dvě rovnice, výškový vlíčovací bod poskytne třetí rovnici jednu rovnici z výše uvedeného systému rovnic oprav. Aplikování MNČ získáme neznámé prvky absolutní orientace.

3.2.5 Fundamentální matice

Orientace překrývajících se snímků je řešena nejen ve fotogrammetrii, ale i v tzv. počítačovém vidění (computer vision). Letecká fotogrammetrie řeší vzájemnou orientaci dvou přibližně svislých snímků pomocí relativní orientace. Počítačové vidění někdy používá alternativní metodu vycházející ze stejné geometrické podmínky (podmínka komplanarity) $p_1^T \cdot (b \cdot p_2) = 0$. Vektorový produkt můžeme popsat pomocí matice **B**, ve které jsou základnové složky vektoru **b**.

$$b \times p_2 = \mathbf{B}p_2 = \begin{bmatrix} 0 & -bz & by \\ bz & 0 & -bx \\ -by & bx & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{2x} \\ p_{2y} \\ p_{2z} \end{bmatrix}$$

Při volbě základnového vektoru $\mathbf{b}^T = (1, 0, 0)$, jak je tomu u relativní orientace používající rotace (nezávislá dvojice) lze předchozí vztah upravit:

$$\mathbf{p}_1 \mathbf{B} p_2 = \mathbf{p}_1 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} p_2 = 0$$

Oba vektory p obdržíme ze snímkových souřadnic, prvků vnitřní orientace a rotačních matic.

$$p_1 = \mathbf{R}_1 \begin{bmatrix} x_1 - x_0 \\ y_1 - y_0 \\ -c_1 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_1 \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & y_0 \\ 0 & 0 & -c_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_1 \mathbf{C}_1 \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{a podobně } p_2 = \mathbf{R}_2 \mathbf{C}_2 \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix}. \text{ Matice } \mathbf{C} \text{ je matice vnitřní orientace snímku.}$$

Dosadíme-li výrazy do podmínky komplanarity obdržíme vztah

$$\mathbf{C}_1^T \mathbf{R}_1^T \mathbf{B} \mathbf{R}_2 \mathbf{C}_2 \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = 0, \text{ zkráceně } \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{F} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = 0.$$

Matici $\mathbf{F} = \mathbf{C}_1^T \mathbf{R}_1^T \mathbf{B} \mathbf{R}_2 \mathbf{C}_2$ nazýváme fundamentální maticí relativní orientace. Podmínku komplanarity můžeme tedy vyjádřit pomocí koeficientů matice \mathbf{F} následujícím způsobem.

$$x_1 x_2 f_{11}^* + x_1 y_2 f_{12}^* + x_1 f_{13}^* + x_2 y_1 f_{21}^* + y_1 y_2 f_{22}^* + y_1 f_{23}^* + x_2 f_{31}^* + y_2 f_{32}^* + f_{33}^* = 0$$

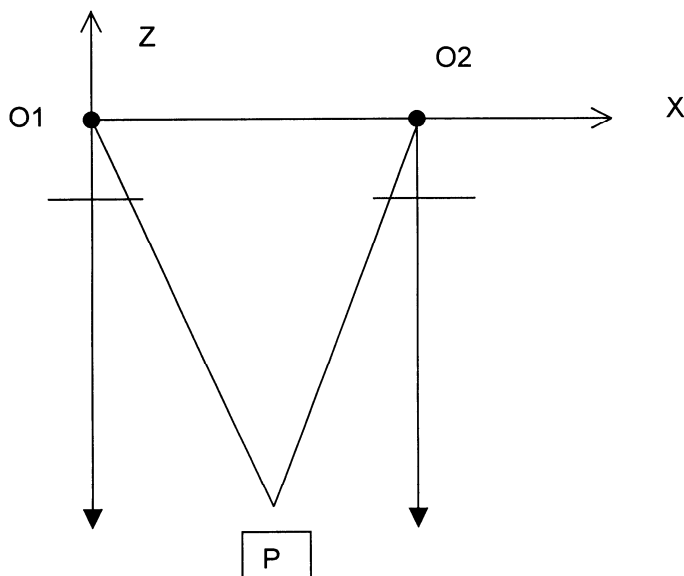
Rovnici lze upravit tak, že jednotlivé prvky matice \mathbf{F} podělíme posledním prvkem. Rovnice pak má tvar

$$x_1 x_2 f_{11} + x_1 y_2 f_{12} + x_1 f_{13} + x_2 y_1 f_{21} + y_1 y_2 f_{22} + y_1 f_{23} + x_2 f_{31} + y_2 f_{32} = 0.$$

Význam poznatek spočívá v tom, že pro bod P na jednom snímku (x_1, y_1) obdržíme jednu lineární rovnici pro obě neznámé souřadnice (x_2, y_2) . Nebo-li k jednomu bodu na jednom snímku odpovídá přímka na snímku druhém, na které obraz bodu P musí ležet. Pomocí rovnic((můžeme určit relativní orientaci snímků u kterých neznáme prvky vnitřní orientace. Pro určení 8 neznámých koeficientů f_{ij} potřebujeme minimálně 8 bodů zobrazených na obou snímcích.

3.2.6 Normální případ

Pro určení polohy bodu je nutné mít dva snímky. Nejjednodušší řešení existuje, když osy kamery svírají pravý úhel se základnou a jsou rovnoběžné obr.3.5. V letecké fotogrammetrii prakticky tento stav nemůže nastat, ale je velmi blízké této konfiguraci. Naopak v pozemní fotogrammetrii bylo možné toto uspořádání realizovat.



Obr.3.5: Normální případ

Prostorou souřadnici X dostaneme z již známé rovnice za předpokladu ($x_0 = y_0 = 0$)

$$X = X_{01} + (Z - Z_{01}) \frac{r_{11}(x) + r_{12}(y) - r_{13}c}{r_{31}(x) + r_{32}(y) - r_{33}c}$$

Jelikož $X_{01} = Y_{01} = Z_{01} = Y_{02} = Z_{02} = 0$, $\omega_1 = \varphi_1 = \kappa_1 = \omega_2 = \varphi_2 = \kappa_2 = 0$,

pak ze snímkových souřadnic prvního snímku určíme prostorové souřadnice

$$X = Z \frac{x_1}{-c}, \quad Y = Z \frac{y_1}{-c} \text{ . Podobně z druhého snímku } X = B + Z \frac{x_2}{-c}, \\ Y = Z \frac{y_2}{-c} \text{ .}$$

Z rovnosti souřadnic X odvodíme vztah pro souřadnici Z

$$Z \frac{x_1}{-c} = B + Z \frac{x_2}{-c}, \quad \Rightarrow Z = \frac{-cB}{x_1 - x_2} = \frac{-cB}{p_x} \text{ .}$$

Z rovnic $X = Z \frac{x_1}{-c}$, $Y = Z \frac{y_1}{-c}$, $Z = \frac{-cB}{p_x}$ můžeme odvodit (uplatněním zákona o šíření chyb), jak je závislá přesnost prostorových souřadnic na měřených snímkových souřadnicích (základnu B a konstantu kamery c považujeme v tomto případě za bezchybnou).

$$\sigma_X^2 = \left(\frac{x}{c} m_s \frac{Z}{B} \sigma_{p_x} \right)^2 + (m_s \sigma_X)^2,$$

$$\sigma_Y^2 = \left(\frac{y}{c} m_s \frac{Z}{B} \sigma_{p_x} \right)^2 + (m_s \sigma_Y)^2,$$

$$\sigma_Z^2 = \left(m_s \frac{Z}{B} \sigma_{p_x} \right)^2.$$

Výše uvedené rovnice popisují obecné zákony přesnosti ve fotogrammetrii:

- 1) Pro konstantní základnový poměr B/Z jsou všechny tři souřadnice přímo úměrné měřítkovému číslu snímku $m_s = Z/c$. Požadované přesnosti může být dosažení volbou vhodného měřítka snímku.
- 2) Pro konstantní měřítko snímku je střední chyba v souřadnici Z nepřímo úměrná základnovému poměru.
- 3) Pro konstantní základnu roste střední chyba v souřadnici Z se čtvercem vzdálenosti kamera-objekt.

Příklad 3.1

$m_s = 10000$, $c = 150$ mm, při $p = 60\%$ bude $B/Z = 1/1.6$, $x = y = 50$ mm,

$$\sigma_{P_x} = \sigma_x = 10 \mu m$$

$$\sigma_x = \sigma_y = 0.11 m, \sigma_z = 0.16 m.$$

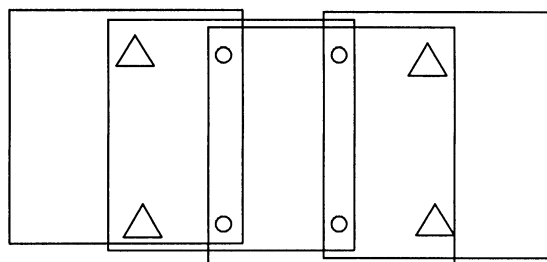
Změníme-li c , $c = 300$ mm, pak $\sigma_x = \sigma_y = 0.15 m$, $\sigma_z = 0.32 m$.

Z výše uvedených vzorců pro výpočet souřadnice Z je možné posoudit vliv chyby v konstantě kamery. Chyba v konstantě kamery způsobí chybu ve výšce bodu $dZ = \frac{Z}{c} dc$. U měřických kamer, kde konstantu kamery máme určenou s vysokou přesností z kalibrace, je tento vliv malý. (pro $m_s = 10000$, $dc = 0,01$ mm, je chyba ve výšce $dZ = 0,10$ m).



4 Aerotriangulace

Pro absolutní orientaci modelu potřebujeme nejméně tři vlícovací body. Proto byly hledány cesty, jak se vyhnout měření velkého počtu vlícovacích bodů při mapování větších území a jak překlenout území bez vlícovacích bodů. Metoda triangulace umožnila osvobodit fotogrammetrii od těchto potíží. Cílem aerotriangulace je určit vnější prvky orientace snímků nebo prvky absolutní orientace modelů a souřadnice určovaných bodů v objektovém systému (X,Y,Z) . Výsledky aerotriangulace (AT) umožní určit podrobné body ve vyhodnocovaných modelech nebo mohou být užity k tvorbě ortofotomap. Princip aerotriangulace je zřejmý z obr. 4.1



Obr. 4.1: Princip AT

Body na snímcích v trojnásobném překrytu v jedné řadě (označené kolečkem) nám umožní navzájem spojit snímky nebo modely dohromady a pomocí nich překleneme území bez vlíčovacích bodů. Tyto body se nazývají navazovací body. Jsou dva způsoby řešení. V případech, kdy bývaly používány analogové přístroje a nebo později již komparátory a méně výkonné počítače bylo používáno řešení založené na modelech. Modely byly na sobě částečně závislé (např. následující model přebíral od předchozího modelu měřítko, byly spojeny v řadu a řady v blok) nebo nezávislé. V současné době je používána metoda vyrovnání nezávislých modelů (block adjustment of independent models). S rozvojem výpočetní techniky se začalo více prosazovat řešení založené na vyrovnání bloku svazků (bundle block adjustment). Tento přístup je přesnější (neuplatní se vliv zbytkových systematických chyb z relativní orientace, jak je tomu v modelovém řešení), lépe se přidávají přídatné parametry a další měření do vyrovnání.

4.1 Vyrovnání bloku svazků (bundle block adjustment)

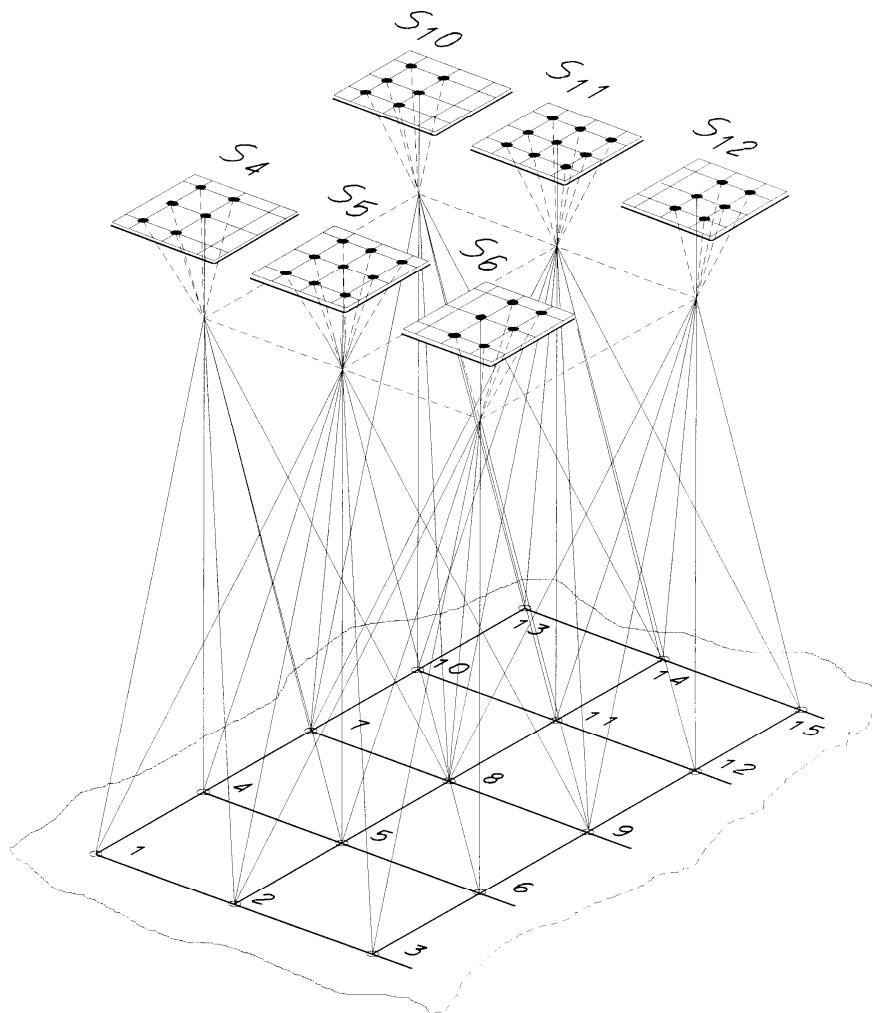
Při vyrovnání bloku svazků paprsků vypočteme přímo vztahy mezi snímkovými souřadnicemi a objektovými souřadnicemi. Základní jednotkou pro vyrovnání bloku svazků je snímek. Snímkové souřadnice s příslušným projekčním centrem určují prostorový svazek paprsků. Princip vyrovnání můžeme definovat následovně: svazky paprsků jsou umístěny (X_0, Y_0, Z_0) a pootočený (ω, ϕ, κ) , takže svazky paprsků se protínají, jak je nejlépe možné v navazovacích bodech a procházejí vlíčovacími body jak nejbližší je možné. Geometrický princip vyjadřuje obr. 4.2. Při vyrovnání jsou současně vypočteny prvky vnější orientace všech snímků (svazků paprsků) bloku. Vstupní data jsou měřené snímkové souřadnice vlíčovacích, navazovacích a určených bodů a objektové souřadnice vlíčovacích bodů. Dále musí být známy přibližné prvky vnější orientace, které se zadají před výpočtem jako vstupní data nebo jsou vypočtena z jiných údajů (měřítko snímku, konstanta kamery, azimut letu apod.)

Vztah mezi snímkovými a objektovými souřadnicemi je popsán rovnicemi

$$x = x_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = F(x)$$

$$y = y_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = G(y)$$

Souřadnice nově určovaných bodů a prvky vnější orientace můžeme určit vyrovnáním. Linearizací rovnic získáme rovnice oprav (pro bod i a snímek j)



Obr.4.2: Blok svazků paprsků

$$v_{xij} = a_1 dX_{0j} + a_2 dY_{0j} + a_3 dZ_{0j} + a_4 d\omega_j + a_5 d\varphi_j + a_6 d\kappa_j + \\ + a_7 dX_i + a_8 dY_i + a_9 dZ_i - (x_{ij}^m - x_{ij}^0)$$

$$v_{yij} = b_1 dX_{0j} + b_2 dY_{0j} + b_3 dZ_{0j} + b_4 d\omega_j + b_5 d\varphi_j + b_6 d\kappa_j + \\ + b_7 dX_i + b_8 dY_i + b_9 dZ_i - (y_{ij}^m - y_{ij}^0)$$

Jednotlivé koeficienty a_i, b_i získáme jako parciální derivací funkcí $F(x)$ a $G(y)$,

$$a_1 = \frac{\partial F}{\partial X_0}, \quad b_1 = \frac{\partial G}{\partial X_0} \quad \text{atd. ,}$$

x_{ij}^m, y_{ij}^m jsou měřené snímkové souřadnice,

x_{ij}^0, y_{ij}^0 jsou snímkové souřadnice vypočtené z přibližných hodnot (předchozí iterace)

V maticovém zápisu mají rovnice oprav tvar $\mathbf{v} = \mathbf{A} \, d\mathbf{x} - \mathbf{l}$. Za podmínky $\Sigma \mathbf{v}^T \mathbf{v} = \min$. získáme normální rovnice

$$\mathbf{0} = \mathbf{A}^T \mathbf{A} \, d\mathbf{x} - \mathbf{A}^T \mathbf{l}$$

Vypočtené neznámé $d\mathbf{x}$ připočteme k přibližným hodnotám prvků orientace a souřadnic bodů. Výpočet se opakuje do splnění kritérií pro ukončení iterací (např. hodnota $\Sigma \mathbf{v}^T \mathbf{v}$ v i - té iteraci se liší od předchozí iterace jen o určitou malou hodnotu). Považujeme-li vlíčovací body za bezchybné v rovnicích oprav pro vlíčovací body nejsou členy s koeficienty $a_7 - a_9, b_7 - b_9$. Struktura normálních rovnic je vidět na obr. 4.3 vlevo. V případě, že souřadnice vlíčovacích bodů považujeme za měřené, takže jsou rovněž předmětem vyrovnání, doplní se rovnice oprav pro každý vlíčovací bod rovnicemi

$$\begin{aligned} v_X &= dX && + (X^0 - X^G) \\ v_Y &= dY && + (Y^0 - Y^G) \\ v_Z &= dZ && + (Z^0 - Z^G) \end{aligned}$$

Metoda vyrovnání bloku svazků umožňuje přidat do vyrovnání další rovnice oprav např. pro GPS měření polohy projekčních center pomocí GNSS, úhlová měření z IMU, přídatné parametry a další. Rovnice oprav pro souřadnice projekčního centra mají tvar

$$\begin{aligned} v_X &= dX_0 && + (X_0^0 - X^{GPS}) \\ v_Y &= dY_0 && + (Y_0^0 - Y^{GPS}) \\ v_Z &= dZ_0 && + (Z_0^0 - Z^{GPS}) \end{aligned}$$

Rovnice oprav pro měřené orientační prvky pomocí IMU mají tvar

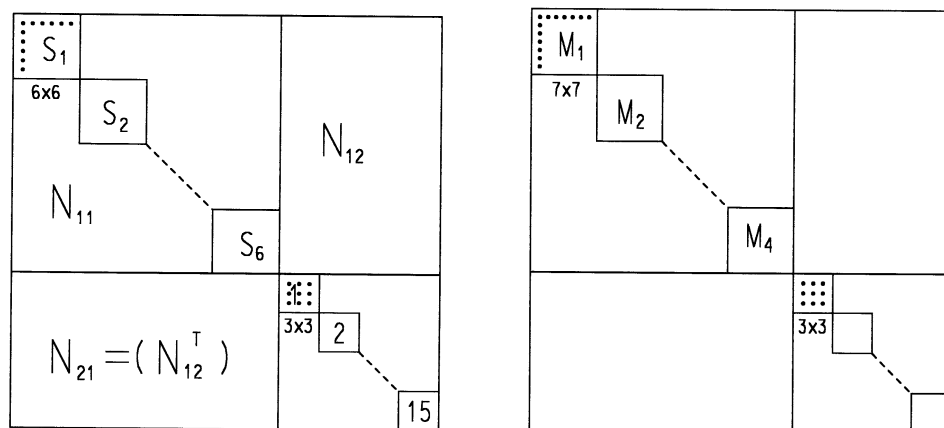
$$\begin{aligned} v_\omega &= d\omega + (\omega^0 - \omega^{IMU}) \\ v_\phi &= d\phi + (\phi^0 - \phi^{IMU}) \\ v_\kappa &= d\kappa + (\kappa^0 - \kappa^{IMU}) \end{aligned}$$

V případě potřeby je možné upřesnit ve vyrovnání i prvky vnitřní orientace, rovnice oprav mají tvar

$$\begin{aligned} v_{x_0} &= dx_0 && + (x_0^0 - x_0^k) \\ v_{y_0} &= dy_0 && + (y_0^0 - y_0^k) \\ v_c &= dc && + (c_0^0 - c^k) \end{aligned}$$

4.2 Metoda nezávislých modelů

Každý model je nezávisle vytvořený na ostatních modelech, obsahuje navazovací body (dvě projekční centra slouží rovněž jako navazovací body) a vlíčovací body (jsou-li v modelu). Projekční centra stabilizují výšky ve směru řady, v příčném směru potřebujeme výškové vlíčovací body. Pro každý navazovací a vlíčovací bod jsou rovnice oprav stejné jako u absolutní orientace s tím, že u navazovacího bodu jsou souřadnice X, Y, Z neznámé parametry. Každý model má vlastní lokální souřadnicový systém. Vyrovnání je definováno následujícím způsobem. Modely jsou pootočený ($d\Omega, d\Phi, dK$), posunuty (dX_p, dY_p, dZ_p) a měřítkově upraveny (dm) tak, aby navazovací body včetně projekčních center držely navzájem pospolu jak nejlépe je možné a opravy na vlíčovacích bodech byly co nejmenší. Struktura normálních rovnic je na obr. 4.3 vpravo.



Obr.4.3: Struktura normálních rovnic

4.3 Přesnost aerotriangulace

Přesnost aerotriangulace je závislá na řadě faktorů: Měřítko snímku, přesnost měření snímkových souřadnic, počet navazovacích bodů, použitý matematický model, geometrie bloku, počet, poloha a přesnost vlíčovacích bodů. Pro odhad přesnosti se používají jednoduché vzorce, použijeme-li přídatné parametry a kameru s širokoúhlým objektivem, lze na signalizovaných bodech dosáhnout přesnosti $\sigma_{X,Y} \approx 5 \mu m m_s$, $\sigma_Z \approx 0,005 \% h$. V případě, kdy se nepodaří eliminovat zbytkové systematické chyby, přesnost může být 2x – 3x nižší, stejně tak u nesignalizovaných bodů.

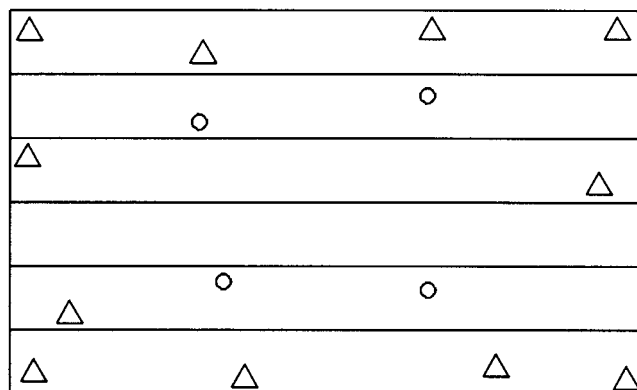
Měřítko snímku je (jak již bylo ukázáno u rozboru přesnosti normálního případu) **jedním z rozhodujících faktorů** při fotogrammetrických pracích.

Přesnost měření snímkových souřadnic je u analytických přístrojů vysoká (2-4 μm), podobné přesnosti je dosahováno díky subpixelové metodě měření i u digitálních stanic. V případě větší velikosti pixelu (20-30 μm) je potřebné přesnosti dosaženo větším počtem navazovacích bodů.

Počet navazovacích bodů při použití analytických přístrojů není velký, pět navazovacích bodů v trojnásobném překrytu je postačující, zvyšování počtu přinese jen malé zvýšení přesnosti, několik bodů navíc je užitečných při používání přídavných parametrů a spolehlivou statistickou analýzu přesnosti vyrovnaného bloku a eliminaci odlehlých měření. V případě digitální technologie velký počet automaticky nalezených bodů urychlí a zefektivní práci, umožní rovněž použití větší velikosti pixelu při digitalizaci snímku a z toho plynoucí nižší nároky na uložení dat.

Matematický model. Použití přídavných parametrů matematického modelu umožní snížit vliv malých zbytkových systematických chyb a tím zvýšit přesnost. Téměř nutností je existence způsobu vyrovnání umožňující vyhledávání chyb, jejich eliminaci a analýzu přesnosti výsledků.

Počet, poloha a přesnost vlíčovacích bodů. Přesnost vlíčovacích bodů rozhoduje o absolutní umístění bloku v prostoru. Současné geodetické metody umožňují určit polohu vlíčovacích bodů s potřebnou přesností. Poloha a počet vlíčovacích bodů úzce souvisí s geometrií bloku. U nepravidelného bloku je potřeba použít větší počet vlíčovacích bodů. Jsou-li vlíčovací body (úplné) pravidelně rozmístěny po okraji bloku – viz obr. 4.4, je přesnost v rámci celého bloku prakticky stejná. Doporučuje se mít vlíčovací bod na každém třetím snímku v řadě na okraji bloku. Vlíčovací body se souřadnicí X,Y nacházející se uvnitř bloku nepřinesou zvýšení přesnosti, jsou užitečné pro kontrolu. Pro dosažení dobré a homogenní přesnosti ve výškách jsou však nutné řetězce výškových vlíčovacích bodů. Opět platí doporučení výškový vlíčovací bod na každém třetím snímku, v každé druhé až třetí řadě. V případě použití měření polohy projekčních center pomocí GPS se počet vlíčovacích bodů podstatně sníží, vlíčovací body jsou nahrazeny měřenými projekčními centry viz kapitola 4.5.

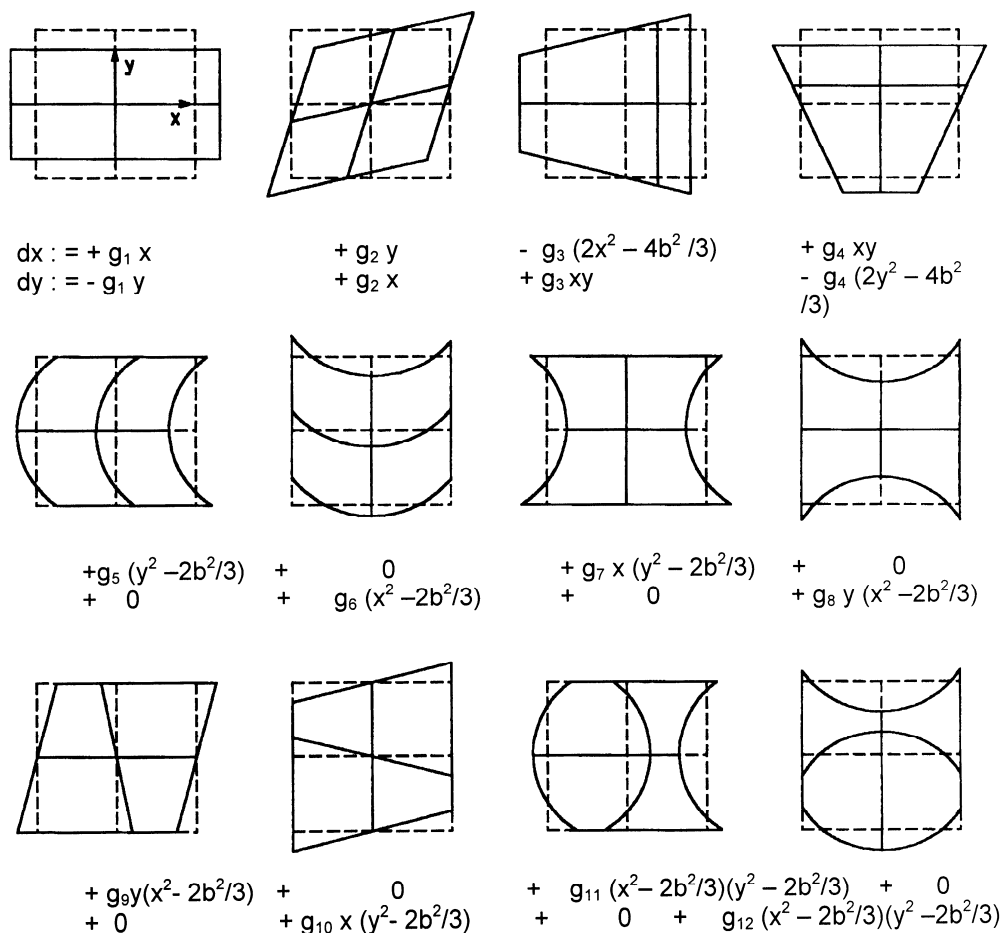


Obr. 4.4: Rozložení vlíčovacích bodů

4.4 Přídavné parametry

V aerotriangulaci byly navrhovány různé varianty přídavných parametrů pro kompenzaci systematických chyb. Pro výběr přídavných parametrů (additional parameters) nejsou dána žádná pravidla. Ebner publikoval pro blokové vyrovnání svazku paprsků soubor 12 – ti přídavných parametrů, které jsou navzájem ortogonální a také jsou ortogonální k prvkům vnější orientace, to znamená, že jen malé korelace se objeví v kofaktorové matici Q_{xx} .

$$\begin{aligned}
 dx = & +g_1x + g_2y - g_3(2x^2 - 4b^2/3) + g_4xy + g_5(y^2 - 2b^2/3) + \\
 & + g_7x(y^2 - 2b^2/3) + g_9y(x^2 - 2b^2/3) + g_{11}(x^2 - 2b^2/3)(y^2 - 2b^2/3) \\
 dy = & -g_1y + g_2x + g_3xy - g_4(2y^2 - 4b^2/3) + g_6(x^2 - 2b^2/3) + \\
 & + g_8y(x^2 - 2b^2/3) + g_{10}x(y^2 - 2b^2/3) + g_{12}(x^2 - 2b^2/3)(y^2 - 2b^2/3)
 \end{aligned}$$



Obr. 4.5: Přídavné parametry (Ebner) - geometrický význam

Vliv Ebnerových přídavných parametrů na změny geometrie snímku je zřejmý z obr. 4.5. Hodnota b reprezentuje základnu na snímku ($b=92$ mm při 60 % podélném překrytu pro formát 23 x 23 cm). Sada přídavných parametrů vybraných z výše uvedených dvanácti se uplatňuje na velké skupiny snímků. Taková skupina snímků je pořízena stejnou kamerou a stejnou filmovou kazetou za stejných atmosférických podmínek, byla vyvolána a uložena za stejných podmínek a je měřena na stejném zařízení. Výše uvedené přídavné parametry nejsou zcela vhodné pro odstranění zkreslení objektivu. Primární zkreslení objektivu je radiální zkreslení, které můžeme popsat následujícími vzorci.

$$dx = g_{13}x(r^2 - r_0^2) + g_{14}x(r^2 - r_0^2) + g_{15}x(r^2 - r_0^2)$$

$$dy = g_{13}y(r^2 - r_0^2) + g_{14}y(r^2 - r_0^2) + g_{15}y(r^2 - r_0^2),$$

kde $r^2 = x^2 + y^2$, r_0 je hodnota r , kde zkreslení bude nulové.

Tangenciální nebo nesymetrické zkreslení lze odstranit pomocí následujících parametrů

$$dx = g_{16}(r^2 + 2x^2) + g_{17}2xy$$

$$dy = g_{16} 2xy + g_{17}(r^2 + 2y^2).$$

Některé přídatné parametry jsou navzájem silně korelovány. Je-li korelační

koeficient $r_{ij} = \frac{q_{ij}}{\sqrt{q_{ii}q_{jj}}}$ větší jak 0,9, je nutné jeden nebo oba parametry

pravděpodobně eliminovat. Když použijeme přídatné parametry ve vyrovnání, začínáme s větším počtem parametrů a postupně je eliminujeme pomocí statistických testů. V testu významnosti porovnáváme hodnotu přídatného

parametru se střední odchylkou (střední chybou) σ_0 , $t_i = \frac{g_i}{\sigma_0 \sqrt{q_{ii}}}$. Nulová

hypotéza, že přídatný parametr g_i není významný, je porovnávána s alternativní hypotézou, že parametr je významný se zvolenou pravděpodobností např. 95%. Doplnkové parametry se používají v aerotriangulaci méně často, většinou pro velmi přesné výzkumné projekty a kalibrace snímkovacích systémů. Výrazně větší význam mají v blízké fotogrammetrii.

4.5 Aerotriangulace s podporou GNSS

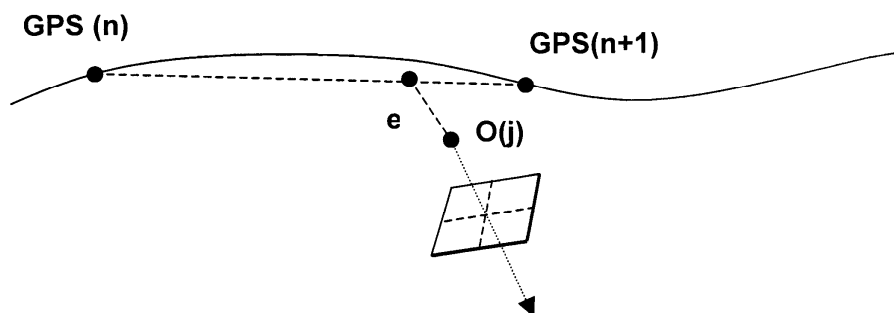
Významný zvrat v měřických technologiích přineslo použití globálních navigačních satelitních systémů (GNSS). Americká technologie se nazývá NAVSTAR-GPS (NAVigation System With Time And Ranging – Global Positioning System), zkráceně GPS. Souřadnice jsou určovány v geocentrické souřadnicovém systému WGS-84, které se převádějí do lokálního národního systému (JTSK, Gauss-Krüger apod.). Ve fotogrammetrii je GPS používáno zejména pro

- Navigaci a řízení leteckého snímání
- Určení vlíčovacích bodů jako alternativa klasických geodetických metod
- Určení souřadnic projekčních center a jejich použití v aerotriangulaci a vyhodnocování

Pro účely navigace musí GPS nepřetržitě určovat polohu letadla v reálném čase a porovnávat je s projektovanou polohou projekčních center. Přesnost navigace počátkem devadesátých let v kinematickém modu používající C/A kód byla cca 50m, v současné době diferenciální GPS v kinematickém modu umožňuje přesnost několika metrů, což je vyhovující pro všechna měřítka snímání. Pro určení vlíčovacích bodů se používá statických metod GPS. Požadovaná přesnost určení polohy vlíčovacích bodů závisí na měřítku snímků, pohybuje se od několika cm do několika metrů, což lze technologií GPS dosáhnout.

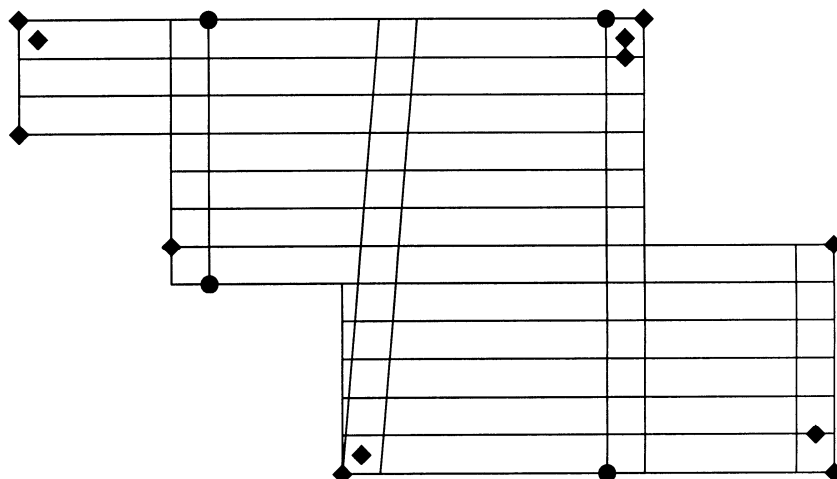
Specifickou roli v aerotriangulaci má počet, uspořádání a přesnost vlíčovacích bodů. Určení vlíčovacích bodů patří k drahým položkám aerotriangulace.

Velké množství času vyžaduje signalizace vlíčovacích bodů a jejich údržba před provedením snímkování. Efektivnost aerotriangulace z hlediska operativnosti a ekonomiky může být zlepšena omezením nutného počtu vlíčovacích bodů. V případě aerotriangulace podporované GPS je poloha projekčního centra určena kinematickou metodou GPS a tato měření jsou zavedena do vyrovnání jako doplňková měření. Během vyrovnání bloku snímků mají polohy projekčního centra stejný význam jako vlíčovací body (projekční centrum = vlíčovací bod). Vlíčovací body jsou pak jen nutné pro vztahování bloku k souřadnicovému systému a analýzu přesnosti.



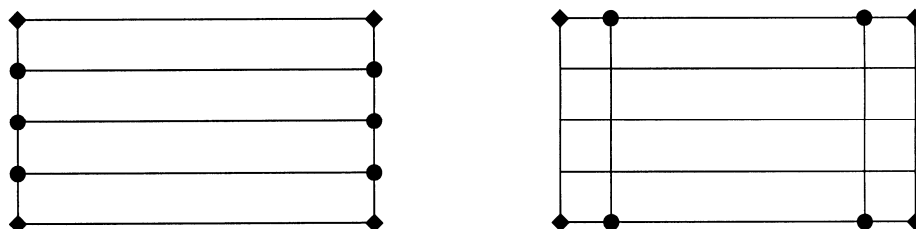
Obr. 4.6: Určení projekčního centra pomocí GPS

GPS přijímač pro určování projekčních center (není identický s navigačním GPS) a kamera pracují nezávisle na sobě, ale kamera poskytuje GPS přijímači elektrický impuls v okamžiku expozice. GPS přijímač zaznamenává data ve frekvenci 1Hz a větší (v současné době jsou již přijímače zaznamenávat data ve frekvenci 20 Hz) proto, aby interpolační chyba byla zanedbatelná. Dráha letadla je prostorová křivka, kterou je možné v krátkém časovém intervalu (např. 0.2 sec) nahradit přímkou, pak se poloha projekčního centra určí lineární interpolací mezi dvěma polohami určenými GPS viz obr. 4.6. Pomocí měření GPS jsou určeny polohy antény. Do rovnic oprav potřebujeme znát dále excentricitu antény a projekčního centra ve snímkovém souřadnicovém systému. Kamera se však během letu otáčí, tím se však mění složky excentricity. Je-li možné instalovat anténu ve svislici nad kamerou, složky excentricity se v souřadnicích x, y jsou malé a vliv pootočení kamery lze zanedbat pro většinu případů. Testování nejvýhodnější konfigurace pravidelného bloku provedla firma INPHO s.r.o v Německu. Pomocí určení projekčních center jsou řady velmi dobře stabilizovány podél směru letu, boční náklon řad zůstává určen hůře. Z tohoto důvodu je potřeba mít na začátku a na konci bloku řadu výškových vlíčovacích bodů nebo dvě příčné řady viz obr. 4.7.



Obr. 4.7: Rozložení vlícovacích bodů a příčných řad v bloku

Výškové vlícovací body jsou označeny tečkou, úplné vlícovací body kosočtvercem. U nepravidelných bloků je nutné mít více příčných řad, podobně u velkých bloků s dlouhými řadami. Někdy je vhodné rozdělit extrémně velké bloky na dílčí bloky. Vlícovací body v rozích by měly být uspořádány tak, aby se zobrazily na co nejvíce snímcích pravidelných i příčných řad. Pro větší spolehlivost a detekci hrubých chyb v datech se doporučuje bod v rohu nahradit dvojicí nebo skupinou vlícovacích bodů. Jednoduchý příklad nepravidelného bloku s výše uvedenými pravidly viz obr. 4.8.



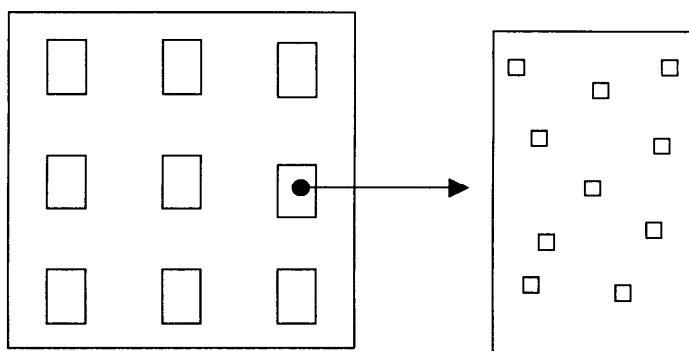
Obr. 4.8: Rozložení vlícovacích bodů a příčných řad v pravidelném bloku

Vzdálenost referenčního přijímače od letadla ovlivňuje přesnost určovaných souřadnic. Ideální je stav, kdy referenční stanice je umístěna v oblasti snímkování na bodě, kde známe souřadnice v systému WGS-84 s potřebnou přesností. Může být však vzdálen 200-300km od letadla. Praktické zkušenosti ukazují, že při vzdálenosti přijímače od referenční stanice 150km je možné určit projekčního centra s přesností řádově 0,1-0,2 m. Firma INPHO zkoumala 23 bloků aerotriangulace podporované GPS. Průměrná empirická přesnost byla charakterizována střední chybou v rovině $m_{XY} = 1.5m_s\sigma_0$ a ve výšce $m_z = 2.2m_s\sigma_0$ při 60% podélném a 20% příčném překrytu pro kameru s konstantou 15 cm. Přesnost vlícovacích bodů a projekčních center je dána vztahem $m_{XYZ} = m_s\sigma_0$. Trojnásobné zvýšení přesnosti vlícovacích bodů a projekčních center přinese zlepšení přesnosti určovaných bodů ne více než 10 %. Desetinásobné snížení přesnosti polohy projekčních center vede jen k dvojnásobnému zhoršení souřadnic určovaných bodů. Pro přesnost je tedy rozhodující přesnost měření snímkových souřadnic a geometrie bloku. Přesnost

GPS měření má menší vliv. Výpočty jsou prováděny v lokálním souřadnicovém systému, do kterého jsou souřadnice z WGS 84 převedeny prostorovou podobnostní transformací. Je nutno zvážit vliv zakřivení Země. Inerciální měřicí jednotka (IMU), jejichž hlavními součástmi jsou gyroskopy a akcelerometry umožňuje určení polohy a orientace snímače. Měřené úhlové prvky vnější orientace mohou rovněž vstupovat do aerotriangulace. Nepřinášejí výrazné zlepšení přesnosti, protože geometrie bloku je držena navazovacími body. V případě kdy geometrická konfigurace bloku je horší, zlepšení přesnosti je vyšší.

4.6 Automatizace v aerotriangulaci

Těžiště automatizace spočívá v ve výběru a měření navazovacích bodů. Dále se uplatní ve vyrovnání s automatickým čištěním dat od odlehlých měření a chyb. Navazovací body jsou vybírány po celé překrytové ploše snímkové dvojice nebo v devíti standardních pozicích – viz obr. 4.9.



Obr. 4.9: Pozice pro výběr navazovacích bodů

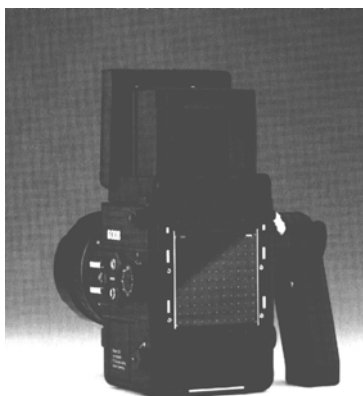
Zde je pomocí vhodného interest operátoru (např. Förstnerův operátor) nalezeno mnoho malých oken, které jsou možnými kandidáty pro obrazovou korelaci. Velikost oken musí dostatečně velká, aby byl zajištěn dostatečný počet navazovacích bodů, ale současně dost malá, aby geometrický model pro kontrolu byl dostatečně dobrý. Obvykle vyhovuje velikost cca 100 x 100 pixelů. V překrývajících se snímcích jsou nalezeny odpovídající si okna postupem nazývaným *multi-image matching* (vzájemné přiřazení více snímků) a je provedena korelace s přesností cca 1/4 až 1/10 velikosti pixelu. Výsledkem je množina párů bodů, u kterých jsou změřeny snímkové souřadnice a které jsou ještě kontrolovány vhodným geometrickým modelem pro eliminaci hrubých chyb ve výběru bodů. Zbývající malé chyby jsou eliminovány při automatizovaném robustním vyrovnání. Číslování bodů je založeno na teorii grafů. Tím, že je použito cca 100 navazovacích bodů na snímku, je dosaženo vysoké přesnosti, a velikost pixelu může být větší než je běžné pro vyhodnocení (až 30 mikrometrů). Střední jednotková chyba při blokovém vyrovnání dosahuje přibližně hodnoty $\sigma_0 = 1/4$ velikosti pixelu.

5 Blízká fotogrammetrie

Blízká fotogrammetrie je část fotogrammetrie zabývající se speciálními aplikacemi ve stavebnictví (dokumentace fasád, měření deformací stavebních konstrukcí, strojírenství (měření částí dopravních prostředků), v památkové péči (dokumentace památek a podklady pro opravy), v archeologii při mapování nálezů, medicíně (porovnání před a pooperačních stavů), kriminalistice pro dokumentaci místa události závažných trestných činů apod. Snímkový objekt se obvykle nachází ve vzdálenosti 1-100m.

5.1 Kamery pro blízkou fotogrammetrii

Kamery s analogový záznamem obrazu na film nebo skleněnou desku se dělily na měřické, částečně měřické a neměřické. Měřická kamera je kamera projektovaná pro měřické účely, jejíž prvky vnitřní orientace jsou stabilní a jsou známy s vysokou přesností. Zkreslení objektivu velmi malé, často zanedbatelné. V současné době se již nevyrábějí. Typickým představitelem byla kamera UMK 10/1318 firmy Zeiss Jena. Bylo možné fotografovat na



skleněné desky

Obr. 5.1: Kamery Rolleiflex 6008 a UMK10/1318

nebo na film, formát snímku 13 x 18 cm, konstanta kamery nejčastěji 100 mm (jsou UMK i s objektivy 65, 200 a 300mm, nejsou výměnné). Zkreslení objektivu jen několik mikrometrů při zaostření na nekonečno. Zaostřování je po krocích tak, že konstanta se mění v kroku 0,40 mm. Zaostřováním se mění zkreslení objektivu, změny konstanty a zkreslení v důsledku zaostřování jsou uvedeny v kalibračním protokolu. Kamera dovoluje pořizovat snímky s nakloněnou osou v krocích po 15 stupních. Neměřická kamera je fotografický přístroj, jejíž prvky vnitřní orientace jsou nestabilní a jsou úplně nebo částečně neznámy. Zkreslení objektivu dosahuje někdy značných hodnot. Nejvíce je používán malý formát 36 x 24 mm, méně často střední formát 6 x 6 cm nebo 4,5 x 6 cm. Částečně měřické kamery vyplňují prostor mezi měřickými a neměřickými. Většinou jsou to kamery se skleněnou destičkou s reseau

(mřížkou) v rovině snímku. Pomocí křížků mřížky (reseau) je eliminována podstatně deformace filmu. Jestliže jsou prvky vnitřní orientace a zkreslení určeny kalibrací, blíží se semiměřické kamery svojí kvalitou měřickým kamerám (např. kamery Rolleiflex 3003 a Rolleiflex 6008, Rolleiflex 3003, formát 24 x 36 mm reseau (mřížka) 5 x 7 bodů ve vzdálenosti 4,5 mm, objektivy v rozsahu 15-350 mm, Rolleiflex 6008, formát 6 x 6 cm reseau (mřížka) 11 x 11 bodů ve vzdálenosti 5 mm, objektivy v rozsahu 40-350 mm). Měřické kamery se již nevyrábějí, v poslední době se nejvíce používají neměřické digitální kamery. Pro účely blízké fotogrammetrie jsou vhodnější digitální zrcadlovky (5-10Mpix) s objektivem s konstantní nominální ohniskovou vzdáleností. Objektiv se „zoomem“ je méně vhodný.

5.2 Metoda svazkového vyrovnání v blízké fotogrammetrii

Souřadnice bodů, prvky vnitřní a vnější orientace můžeme určit vyrovnáním. Linearizací zobrazovacích rovnic centrální projekce získáme rovnice oprav (pro bod i a snímek j)

$$v_{xij} = a_1 dx_{0j} + a_2 dc_j + a_3 d\omega_j + a_4 d\varphi_j + a_5 d\kappa_j + a_6 dX_{0j} + a_7 dY_{0j} + a_8 dZ_{0j} + a_9 dX_i + a_{10} dY_i + a_{11} dZ_i + (x_{ij}^0 - x_{ij}^m)$$

$$v_{yij} = b_1 dy_{0j} + b_2 dc_j + b_3 d\omega_j + b_4 d\varphi_j + b_5 d\kappa_j + b_6 dX_{0j} + b_7 dY_{0j} + b_8 dZ_{0j} + b_9 dX_i + b_{10} dY_i + b_{11} dZ_i + (y_{ij}^0 - y_{ij}^m)$$

V případě, že hodnoty prvků vnitřní orientace považujeme za měřené, doplníme rovnice oprav pro prvky vnitřní orientace

$$\begin{aligned} v_{x_0} &= dx_0 && + (x_0^0 - x_0^k) \\ v_{y_0} &= dy_0 && + (y_0^0 - y_0^k) \\ v_c &= dc && + (c_0^0 - c^k) \end{aligned}$$

podobně pro souřadnice vlíčovacích bodů

$$\begin{aligned} v_X &= dX && + (X^0 - X^G) \\ v_Y &= dY && + (Y^0 - Y^G) \\ v_Z &= dZ && + (Z^0 - Z^G) \end{aligned}$$

5.3 Metoda přímé lineární transformace

Zobrazovací rovnice centrální projekce je možné přepsat do tvaru

$$x = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad y = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1}$$

Pro každý vlíčovací bod je možné sestavit následující rovnice oprav

$$v_x = L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4 - L_9 Xx - L_{10} Yx - L_{11} Zx - x$$

$$v_y = L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8 - L_9 Xy - L_{10} Yy - L_{11} Zy - y$$

Transformační koeficienty L_i jsou určeny vyrovnaním. Výše uvedené rovnice lze doplnit o koeficienty eliminující zkreslení objektivu. Jedenáct transformačních koeficientů zahrnuje v sobě prvky vnější a vnitřní orientace, jeden parametr popisující rozdíl v měřítku mezi osami x a y a jeden parametr popisující nekolmost os x a y .

Z koeficientů L_i lze vypočítat prvky vnější a vnitřní orientace, jejich přesnost je nižší než u metody svazkového vyrovnaní. Máme-li dvojici snímků, lze určit prostorové souřadnice jakéhokoliv bodu, který je zobrazen na obou snímcích řešením soustavy následujících rovnic. Čárky u znaku v rovnicích označují identifikaci snímku.

$$x' = (L'_1 - L'_9 x')X + (L'_2 - L'_{10} x')Y + (L'_3 - L'_{11} x')Z + L'_4$$

$$x'' = (L''_1 - L''_9 x'')X + (L''_2 - L''_{10} x'')Y + (L''_3 - L''_{11} x'')Z + L''_4$$

$$y' = (L'_5 - L'_9 y')X + (L'_6 - L'_{10} y')Y + (L'_7 - L'_{11} y')Z + L'_8$$

$$y'' = (L''_5 - L''_9 y'')X + (L''_6 - L''_{10} y'')Y + (L''_7 - L''_{11} y'')Z + L''_8$$

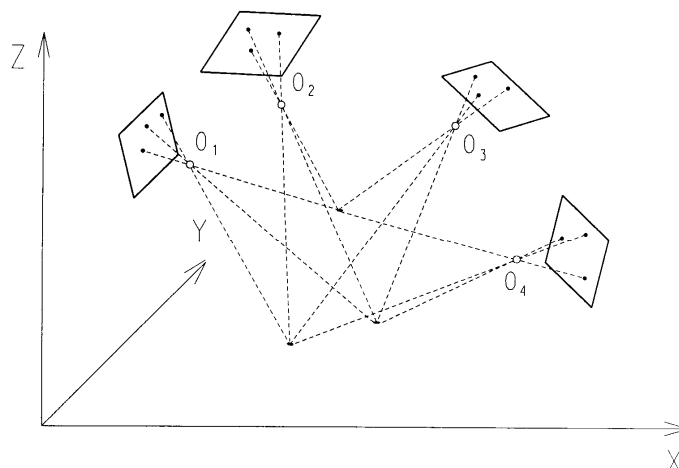
Metoda přímé lineární transformace vyžaduje dobré prostorové rozložení vlíčovacích bodů. Jsou-li vlíčovací body rozloženy v blízkosti obecně orientované roviny snižuje se spolehlivost určení transformačních koeficientů. V případě, že všechny vlíčovací body leží v jedné rovině, úloha nemá řešení. Rovněž rovina rovnoběžná se snímkovou rovinou a procházející projekčním centrem nesmí být blízko počátku souřadnicového systému, neboť $(L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1 \approx 0)$. Výhodou přímé lineární transformace je lineární vztah mezi snímkovými a objektovými souřadnicemi. Snímkové souřadnice mohou být afinně přetvořeny, nepotřebujeme rámové značky a žádné informace o prvcích vnitřní a vnější orientace. Nevýhodou je potřeba většího počtu vlíčovacích bodů než u metody bundle adjustment a splnění určitých výše uvedených podmínek. Je ji možné použít jako doplňkovou metodu.

5.4 Přesnost blízké fotogrammetrie

Přesnost určení souřadnic bodů v blízké fotogrammetrii závisí na geometrických a negeometrických faktorech.

Ke **geometrickým faktorům** patří

- 1) Měřítko snímku, což je dáno konstantou kamery (ohniskovou vzdáleností) a vzdáleností projekčního centra od objektu. Větší měřítko snímku znamená větší přesnost.
- 2) Velikost úhlu, pod kterým se paprsky protnou. Optimální úhel protnutí paprsků je 90° , avšak tento úhel je příliš velký, pro dobrou identifikaci a měření bodu je žádoucí, aby osa terče (bodu) svírala s paprskem úhel ne větší jak 30° .
- 3) Rozmístění vlíčovacích bodů. Vlícovací musí body obklopovat rovnoměrně celý prostor s objektovými body. V opačném případě přesnost klesá.
- 4) Geometrie snímkování. Nejvyšší přesnosti dosáhneme, když v blízké fotogrammetrii



Obr.5.3: Princip konvergentního snímkování z více stanic

použijeme konvergentní snímkování z více stanic (multi-station photogrammetry). Za konfiguraci snímkování z více stanic je považováno měření objektu, když zájmový prostor je zobrazen na třech a více snímcích, které jsou pořízeny z míst od sebe vzdálených – jednoduchý příklad viz obr. 5.3. Metoda snímkování z více stanic má dvě významné vlastnosti, které mají významný vliv na zvýšení přesnosti a spolehlivosti: a) bod je určen protnutím více jak dvěma konvergentními paprsky, b) nadbytečnost měření. U metody snímkování z více stanic se rovněž lépe hledají odlehlá měření a eliminují systematické chyby. Normální případ však není zcela odmítnut. Jsou případy, kdy z důvodu stereoskopického vidění a měření je normální případ preferován i za cenu ne optimální přesnosti.

Kromě vlíčovacích bodů je dobré mít na snímku i několik signalizovaných bodů, které jsou rozloženy po celé ploše snímku a slouží jako navazovací (spojovací) body a body sloužící pro zkvalitnění výpočtu prvků vnější

orientace snímků. Tyto body mohou, ale nemusí být body na objektu, který měříme.

Pro odhad přesnosti souřadnice bodu při snímkování z více stanovisek používá často přibližného vzorce

$\sigma_p = \frac{q \sigma_x m_s}{\sqrt{k}}$, kde σ_p je očekávaná průměrná střední chyba v poloze bodu

$\sigma_p = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}$, σ_x je chyba ve snímkové souřadnici (reálná hodnota), m_s je průměrné měřítko, k je průměrný počet snímků pořízených z jednoho stanoviska a q je konfigurační faktor ve udávaný ve velikosti 0.4 - 0.7 pro konvergentní snímkování a 1.5 – 2.0 pro normální případ.

Příklad 1. Přesné měření v inženýrsko-průmyslových aplikacích - kamera s konstantou kamery $c = 50$ mm, vzdálenost kamery od objektu je 20 m, signalizované body, snímkování z více stanovisek, parametry $k = 2$, $q = 0.7$, $\sigma_x = 5 \mu m \Rightarrow \sigma_p = 1.0$ mm.

Příklad 2. Měření fasády, částečně měřická kamera s konstantou kamery $c = 50$ mm, vzdálenost kamery od objektu je 20 m, normální případ snímkování, parametry $k = 1$, $q = 2$, $\sigma_x = 15 \mu m \Rightarrow \sigma_p = 12$ mm.

Mezi **negeometrické faktory** patří

- 1) Matematický model pro odstranění systematických chyb, zejména zkreslení objektivu (dokonalejší model zlepši přesnost, kvalitnější objektiv nevyžaduje složitý model).
- 2) Přesnost měření snímkových souřadnic.
- 3) Počet snímků z jednoho stanoviska (zvýší se počet měření).
- 4) Tvar (symetrie) a osvětlení bodů. U signalizovaných bodů se doporučuje symetrický terč, jehož velikost v rovině filmu je 40-80 μm , u digitálních kamer alespoň 5-10 pixelů.
- 5) Použití kamery s reseau (eliminace deformace filmu zlepši přesnost), nerovinnost filmu v souvislosti s velikostí obrazového úhlu kamery (u širokoúhlých objektivů se více projeví chyby z nerovnosti filmu).
- 6) Způsob vyrovnaní v souvislosti s metodou eliminace odlehklých měření.

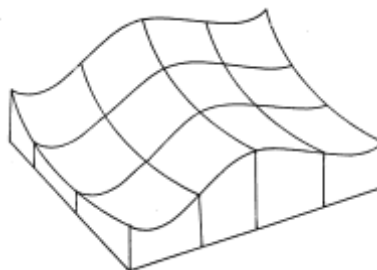
Existuje několik možností, jak zvýšit přesnost měření při daném přístrojovém vybavení. Jde o opakování nastavení a měření bodů na snímků, bod na objektu je reprezentován shlukem terčů a opakování expozice z jednoho stanoviska. Největší efekt přináší opakování expozic z jednoho stanoviska a nejmenší efekt opakování měření snímkových souřadnic. Není však účelné provádět více jak tři snímky z jednoho stanoviska, další přírůstek přesnosti je zanedbatelný.

Spolehlivost definujeme jako kvalitu matematického modelu s ohledem na detekci chyb modelu (chyby ve funkčním modelu např. špatný výběr přídatných parametrů nebo chyby ve stochastickém modelu špatná volba vah měření). Vnitřní spolehlivost je dána velikostí chyby, kterou nejsme schopni nalézt na určité hladině významnosti, vnější spolehlivost testuje vliv neodhalitelných chyb na přesnost vyrovnaných parametrů. Vnitřní spolehlivost lze zkoumat pomocí matice \mathbf{Q}_{vv} . Globálním indikátorem vnitřní spolehlivosti je nadbytečnost nebo-li počet nadbytečných měření

$r = m - n = \sum_{i=1}^m r_i = \sum_{i=1}^m (\mathbf{Q}_{vv} \mathbf{P})_{ii}$. Individuální číslo nadbytečnosti r_i leží v rozsahu $[0, 1]$, a indikuje vliv chyby měření na opravu měření. Za špatně kontrolovatelné měření (nespolehlivé) je považováno takové, kdy $r_i \leq 0.2$. Pro hodnocení spolehlivosti projektu se používá relativní nadbytečnost $\bar{r} = \frac{r}{n}$. Pro projekty s vysokými nároky na přesnost a spolehlivost je požadováno, aby $\bar{r} \geq 0.6$. Toho dosáhneme snímkováním z více stanovisek a pořízením více snímků z jednoho stanoviska kamer.

5.4.1 Hlavní faktory omezující přesnost fotogrammetrických měření

Hlavní faktory omezující přesnost fotogrammetrických měření zejména u neměřických kamer jsou systematické chyby zahrnující deformace záznamového média ve snímkové rovině a zkreslení objektivu. U filmu se jedná zejména o nerovinnost filmu. Nerovinnost filmu je nebezpečná zejména u kamer s širokoúhlými objektivy na okraji snímku. Ta je způsobena tím, že neměřické kamery nejsou konstrukčně speciálně upraveny pro zabezpečení



rovinosti filmu.

Obr.5.4: Deformace filmu v rovině snímku

Tento nedostatek lze eliminovat částečně pomocí přídavných parametrů. Povrchu filmu může být ve tvaru např. viz obr. 5.4. Digitální snímače nevykazují významné deformace. Eliminaci zkreslení objektivu bylo věnováno velké úsilí řady odborníků. Často je používány přídavné parametry ve tvaru polynomu

$$dx = x(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2 xy$$

$$dy = y(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + P_2(r^2 + 2y^2) + 2P_1 xy.$$

Koeficienty K_i, P_i popisují radiální a tangenciální zkreslení objektivu a do vyrovnání jsou zahrnuty jako přídavné parametry. Existuje množství různých modelů, nejlepší srovnatelné výsledky poskytly následující modely

$$dx = a_1x + a_2y + a_3xy + a_4y^2 + a_5x^2y + a_6xy^2 + a_7x^2y^2 + \frac{x}{c} (a_{13}(x^2 - y^2) + a_{14}x^2y^2 + a_{15}(x^4 - y^4)) + x(a_{16}r^2 + a_{17}r^4 + a_{18}r^6)$$

$$dy = a_8xy + a_9x^2 + a_{10}x^2y + a_{11}xy^2 + a_{12}x^2y^2 + \frac{y}{c} (a_{13}(x^2 - y^2) + a_{14}x^2y^2 + a_{15}(x^4 - y^4)) + y(a_{16}r^2 + a_{17}r^4 + a_{18}r^6) \text{ (Brown)}$$

$$dx = x(K_1r^2 + K_2r^4) + (P_1x + P_2y + P_3xy + P_4y^2)$$

$$dy = y(K_1r^2 + K_2r^4) + (P_5xy + P_6x^2) \text{ (Murai)}$$

Programový systém ORIENT (TU Wien, Kager, Kraus 1976) používá více než dvě desítky přídavných parametrů pro eliminaci zkreslení sestavených do obecného polynomu, v němž je možné volit různé kombinace koeficientů, původní model má tvar

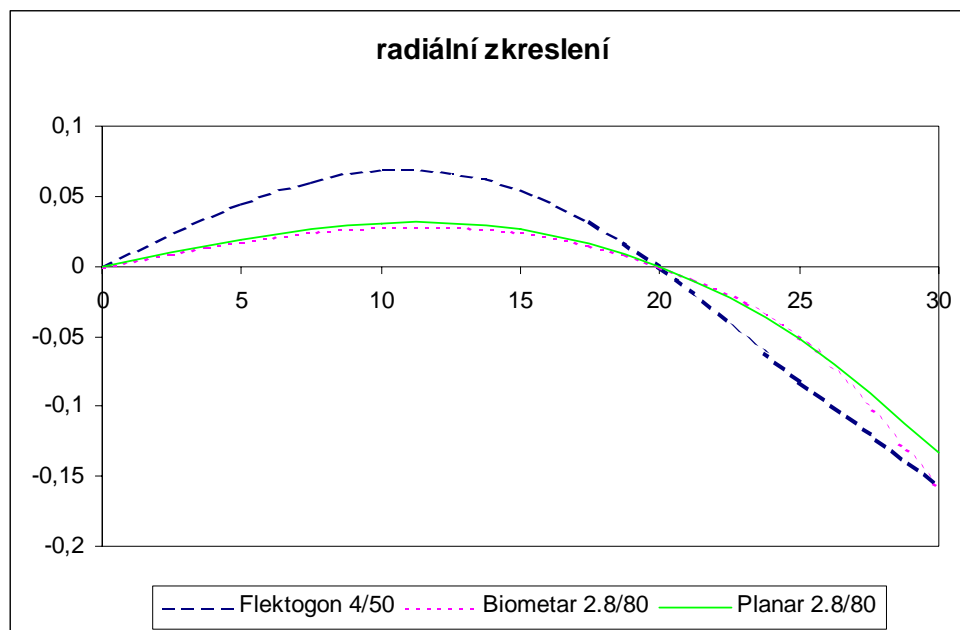
$$x_0 = x_0 + dx = x_0 + \sum (a_i \cdot dx_i)$$

$$y_0 = y_0 + dy = y_0 + \sum (a_i \cdot dy_i)$$

$$\begin{aligned} dx &= a_3x(r^2 - 1) + a_4x(r^4 - 1) + a_5(r^2 + 2x^2) + a_62xy + \\ &+ a_7(-x) + a_8(-y(x^2 - y^2))/r^2 + \\ &+ a_9(-2xy^2)/r^2 + a_{10}xy + a_{11}y^2 + a_{12}x^2y + a_{13}xy^2 + a_{14}x^2y^2 \\ dy &= a_2y + a_3y(r^2 - 1) + a_4y(r^4 - 1) + a_6(r^2 + 2x^2) + \\ &+ a_52xy + a_7y + a_8x(x^2 - y^2)/r^2 + \\ &+ a_9(-2x^2y)/r^2 + a_{14}xy + a_{16}x^2 + a_{17}x^2y + a_{18}xy^2 + a_{19}x^2y^2, \end{aligned}$$

kde $r^2 = x^2 + y^2$, $x = x/r_0$, $y = y/r_0$, r_0 je normalizovaný rádius, tj. rádius, kdy symetrické zkreslení je rovno nule.

Je nutné si vždy uvědomit, že matematický model je aproximací skutečnosti a vliv nejistoty v modelu má být menší než nejistota v měření. Celkový počet parametrů má být co možná nejmenší, ale ještě dostatečný pro získání spolehlivého odhadu parametrů. Je potřeba nepodlehout pokušení použít velké množství parametrů v zájmu co nejrealističtějšího modelu. Velký počet přídavných parametrů přináší nižší stabilitu řešení. Z řady experimentů prováděných v 70-tých a 80-tých letech vyplynulo, že u neměřických kamer není nutno používat vzorce pro eliminaci zkreslení s velkým počtem parametrů. V řadě případů stačí jeden nebo dva parametry pro eliminaci radiálního zkreslení, přidáním dalších parametrů se přesnost zvýší jen nepatrně. Tuto skutečnost potvrzují i novější experimenty s digitálními kamerami. Obr.



x 6cm (Flektogon a Biometar pro Pentacon Six, Planar pro Rolleiflex 6008).

Obr. 5.5: Zkreslení objektivu neměřické kamery

5.4.2 Kalibrace neměřických kamer

Neměřické kamery používané často v blízké fotogrammetrii definujeme jako kamery, jejichž prvky vnitřní orientace jsou nestabilní a nejsou známy úplně nebo částečně. Hlavní faktory omezující přesnost fotogrammetrických měření zejména u neměřických kamer s analogovým záznamem obrazu jsou systematické chyby zahrnující deformace filmu ve snímkové rovině a zkreslení objektivu. U filmu se jedná zejména o nerovinnost filmu, která je nebezpečná zejména u kamer s širokoúhlými objektivy na okraji snímku. U digitálních kamer zůstává rozhodujícím faktorem (při současných rozměrech obrazových senzorů) eliminace zkreslení objektivu a stabilita prvků vnitřní orientace. Doporučuje se, aby snímky byly pořízeny u celého projektu s konstantním zostřením, to znamená, aby všechny snímky projektu (pokud je to možné) měly stejné prvky vnitřní orientace. Toho dosáhneme nejlépe použitím zrcadlovky s objektivem s neměnným ohniskem, zaostřeným na jednu vzdálenost. Horší je situace u objektivů s proměnlivou ohniskovou vzdáleností (zoom). Nejhorším případem je použití, kde většinou není možné vypnout automatické zaostřování, takže pro každý snímek je potřeba určit prvky vnitřní orientace samostatně. U objektivů zrcadlovek s nominální hodnotou 50 mm lze očekávat malé zkreslení (do 20 μm). u širokoúhlých objektivů, větší odnoty (20-70 μm), ale pravidelné a dobře eliminovatelné zkreslení. U objektivů s nominální hodnotou ohniskové vzdálenosti menší jak 20 mm lze očekávat větší hodnoty zkreslení. Neměřické kamery můžeme kalibrovat. Kalibrace vyžaduje velmi přesné bodové pole, které je prostorově členité, aby bylo možné s dostatečnou

přesností stanovit konstantu kamery. Body musí být rovnoměrně rozloženy s dostatečnou hustotou pro spolehlivé stanovení prvků vnitřní orientace a přidavných parametrů. Snímky je potřeba pořídit z několika různých stanovisek s optimální geometrií (konvergentní), vhodné je z jednoho stanoviska pořídit dva snímky navzájem otočené o 90 stupňů vzhledem k ose záběru, lépe se určí poloha hlavního bodu. V případě, že pořídíme cca 6 snímků, je obvykle v prvcích vnější orientace u objektivů s nominální hodnotou 50 mm dosažena střední chyba $\sigma = 6 - 10 \mu m$ a u objektivů s nominální hodnotou cca 28 mm dosažena střední chyba $\sigma = 4 \mu m$. V případě subpixelové korelace pro měření snímkových souřadnic je možné dosáhnout vyšší přesnosti $\sigma = 1 - 2 \mu m$. Zvyšování počtu snímků (více jak 10) nemá příliš velký význam, protože přesnost zlepšíme jen mírně. Vzhledem k tomu, že při snímkování měřeného objektu nejsme schopni přesně obnovit prvky vnitřní orientace (tak jaké byly v čase kalibrace), jsou získané hodnoty z kalibrace postačující pro výpočet úloh nevyžadující vysokou přesnost. V případě vysokých požadavků na přesnost je nutné upřesnit prvky vnitřní orientace při vyrovnání v konkrétní úloze. Při vyrovnání předběžná znalost prvků vnitřní orientace a přidavných parametrů z kalibrace umožňuje postupovat rychleji a s větší jistotou eliminujeme odlehle hodnoty v měření snímkových souřadnic.

5.5 Aplikace blízké fotogrammetrie

Blízká fotogrammetrie nachází uplatnění v mnoha oborech, zejména však ve stavebnictví, kde je využívána pro

Kontrolní měření geometrických parametrů stavebních dělů a konstrukcí

Zatěžkávací zkoušky

Měření deformací konstrukcí např. střešní konstrukce

Výkresy fasád

Měření sesuvů

Stanovení plochy povrchu stavební konstrukce

Stanovení kubatur skládek sypkých materiálů

Kalibrace velkoprostorových nádrží a zásobníků

Měření geotechnických modelů

Rekonstrukce výkresové dokumentace poškozeného objektu z archívních snímků

Digitální modely terénu a povrchu

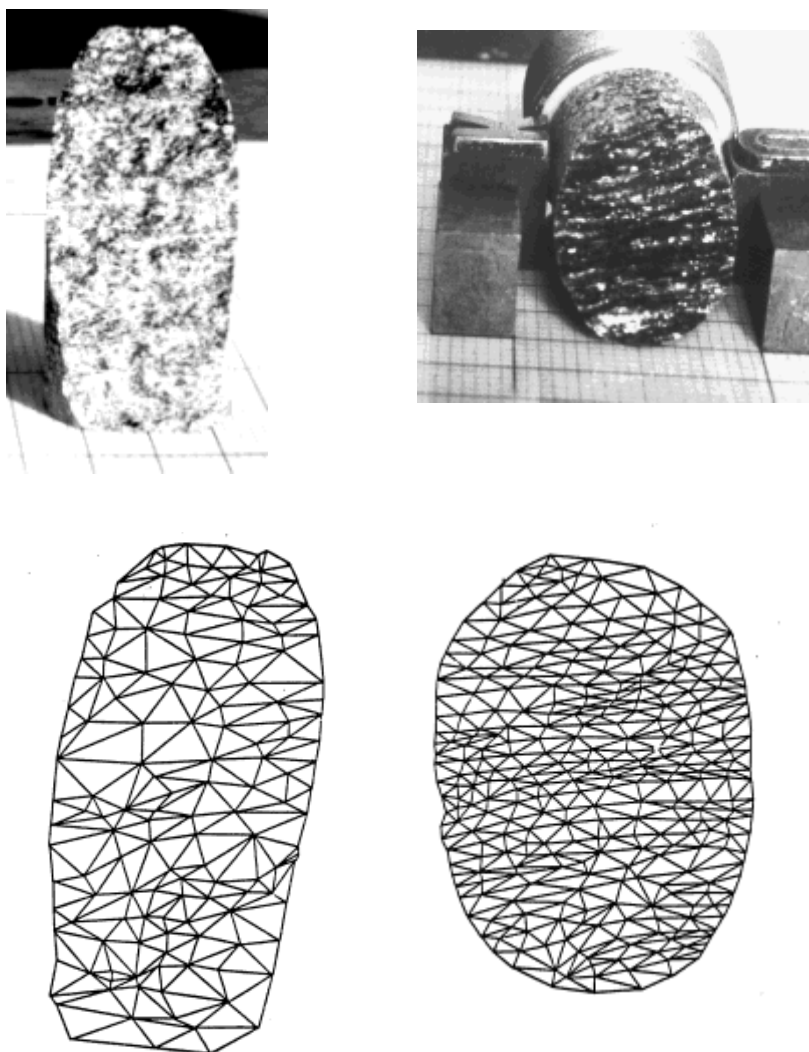
Kontrolní měření průjezdných profilů na železnici a podzemních dráhách.

Velmi častým případem je vyhotovení výkresů fasád. Uvedený příklad na obr. 5.6 ukázkou použití neměřické kamery malého formátu. Fasádu pokrývaly tři stereodvojice, dosažená přesnost cca 3 cm.



Obr.5.6 Fasáda – snímek a vyhodnocený výkres

Následující aplikace je z oblasti velmi blízké fotogrammetrie. Pro předpovídání vlastností hornin je nutné ověřit mechanické vlastnosti pomocí testů v laboratoři. Pro určení lomových kritérií je potřeba získat co nejpřesněji skutečnou plochu lomu. Snímky vzorků byly pořízeny neměřickou kamerou Practica ze vzdálenosti 30 cm při požití mezikroužku. Oblast lomu vzorku byla rozdělena do malých trojúhelníkových plošek, jejichž vrcholy byly určeny fotogrammetricky. Součet plošek trojúhelníků určil velikost plochy lomu. Vzorky a trojúhelníková síť bodů viz obr.5.7.



Obr. 5.7: Vzorky a trojúhelníková síť bodů

Ve velmi blízkém prostoru je obtížné určit vlíčovací body, geodetické měření nepřichází v úvahu. Vzorek byl umístěn na fólii s vykreslenou mřížkou a na ni byly postaveny kovové hranolky. Souřadnice vlíčovacích bodů (rohy hranolků a body na mřížce) byly tak stanoveny s přesností cca 0.05 – 0.10 mm.



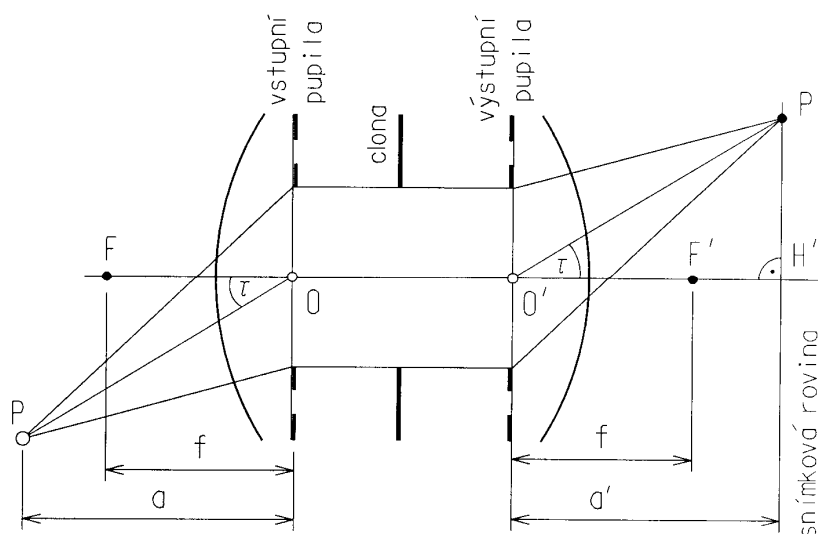
Obr. 5.8: Měření deformace klenby

Další ukázka je rovněž z oblasti výzkumu na stavební fakultě. Fotogrammetrickou metodu jsou určeny deformace zatěžované klenby.

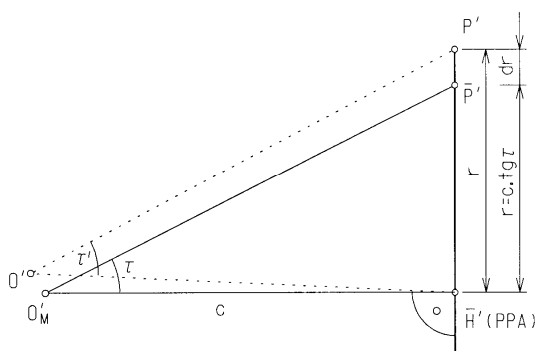
6 Pořízení leteckých snímků

6.1 Měřické letecké kamery

Měřický snímek může být definován jako snímek co možná geometricky nejbližší centrální projekci s projekčním centrem ve vzdálenosti a' z hlavního bodu snímku. Poloha hlavního bodu H' a zejména konstanta kamery (prvky vnitřní orientace) jsou parametry matematicko-geometrického modelu popsaného zobrazovacími rovnicemi. Představme si idealizovaný objektiv bezvadně realizující geometrické zobrazení obr. 6.1.



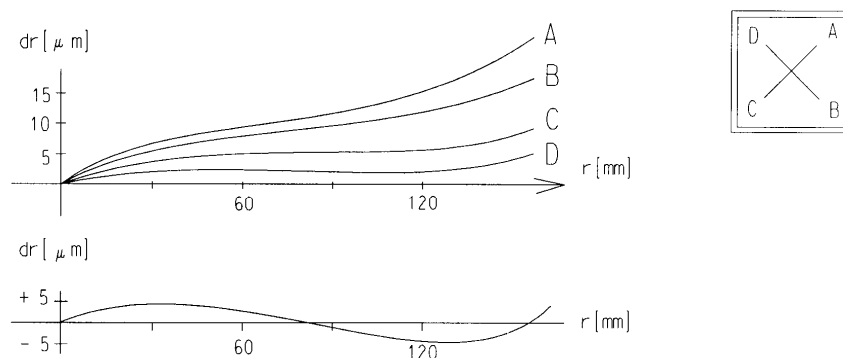
Obr. 6.1: Zobrazení idealizovaným objektivem



Obr. 6.2: Konstanta kamery

Předpokládejme objektiv složený ze dvou symetricky stejných částí, uprostřed objektivu je clona. Projekční centra leží v hlavních optických rovinách uprostřed vstupní, resp. výstupní pupily. Uzlové body jsou identické s projekčními centry a úhlové zvětšení je rovno jedné ($\tau = \tau'$). Reálný objektiv se od idealizovaného objektivu liší. Objektivy vyrobené v posledních dvaceti letech nejsou symetrické, jsou složené z 8 - 12 čoček z různého druhu skla pro korekci zobrazovacích vad, clona neleží uprostřed optického systému. Optická osa by měla obsahovat středy všech sférických ploch čoček, což není možné bezchybně provést při lepení a montáži všech čoček do objektivu. Optickou osu nahradí kalibrovaný hlavní paprsek jehož průsečík s rovinou snímku se nazývá hlavní bod autokolimace (principal point of autocollimation, PPA). Rám snímku mechanicky reprezentující snímkovou rovinu není přesně kolmo k optické ose. Mechanicky realizovaná konstanta kamery a'_m se mírně liší od optické konstanty kamery a' . Střed vstupní pupily neleží přesně v hlavní rovině. V důsledku výše uvedených malých chyb úhel τ' není roven

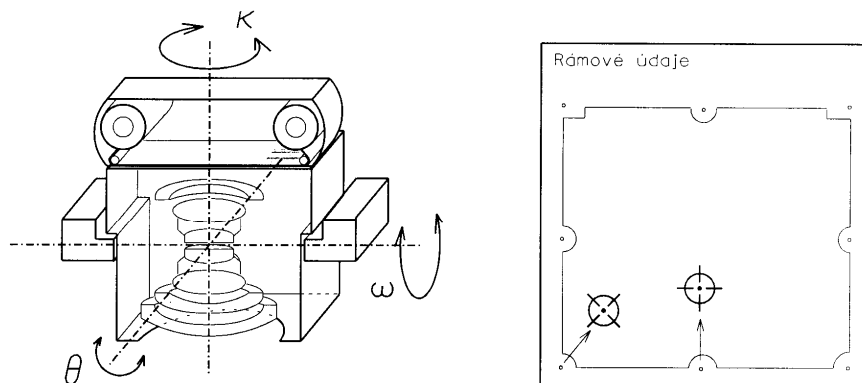
τ . Je proto nutno definovat matematické projekční centrum O'_M ve vzdálenosti $c = \text{konstanta kamery}$ z hlavního bodu autokolimace tak, aby úhel τ byl reprodukován, jak nejlépe je možné viz obr. 6.2. Zbytkové chyby představují optické zkreslení objektivu $dr = r - c \operatorname{tg} \tau$, kde $r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2$, které zahrnujeme mezi prvky vnitřní orientace. Měřické kamery jsou kalibrovány v laboratoři pomocí optického goniometru. Do snímkové roviny je umístěna rovná skleněná deska s přesnou stupnicí. Nejprve je zjištěn bod autokolimace PPA od něhož se odměřují vzdálenosti r . Pak se k různým hodnotám na stupnici r ve směru úhlopříček odměřují úhly τ . Radiální zkreslení se vypočte z rozdílů $dr = r - c_0 \operatorname{tg} \tau$, kde c_0 je nejlépe dosud známá hodnota konstanty kamery. Výsledky v jednotlivých polodiagonálách (A,B,C,D) nejsou symetrické, což je způsobeno jednak chybami v centraci jednotlivých čoček v objektivu viz obr. 6.3 nahoře, a přesností s jakou lze stanovit hlavní bod autokolimace PPA. Malou změnou kalibrovaného paprsku do bodu nejlepší symetrie PBS (principal point of best symmetry) je možné dosáhnout podstatné zmenšení nesymetrie radiálního zkreslení v polodiagonálách. Souřadnice x_0, y_0 jsou pak vztaženy k PBS. Radiální zkreslení je přepočteno k PBS. Nakonec se počítá změna konstanty kamery dc tak, aby střední křivka zkreslení (průměr ze čtyř polodiagonál) byla co nejbližší osy r viz obr.6.3 dole. Toho můžeme dosáhnout stanovením různých podmínek. Např. $|dr_{\min}| = |dr_{\max}|$ nebo $\sum (dr)^2 = \min$. pro rovnici



Obr. 6.3: Radiální zkreslení

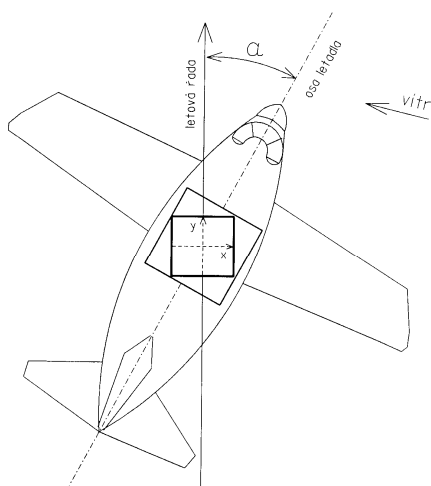
$dr = r - (c + dc) \operatorname{tg} \tau$. U leteckých měřických kamer vyrobených v posledních dvaceti letech radiální zkreslení nepřesáhne hodnotu $5 \mu\text{m}$ pro $c=150, 210, 305$ mm a $8 \mu\text{m}$ pro $c=90$ mm. U dobře seřízené kamery střed rámových značek FC, PPA a PBS leží v kroužku se středem v FC o poloměru menším jak $20 \mu\text{m}$. Kolmo na směr radiální zkreslení se může projevit tangenciální zkreslení, které dosahuje maximálně hodnot radiálního zkreslení, většinou je několikrát menší cca $1 - 2 \mu\text{m}$. Kalibrační protokol poskytuje tyto informace o prvcích vnitřní orientace: snímkové souřadnice rámových značek, souřadnice PPA, PBS, FC, konstantu kamery, tabulkované hodnoty radiálního zkreslení nebo křivku střední radiální distorze. Rámové značky bývaly 4, nyní je 8

značek. Formát kamer je výhradně 23 x 23 cm. Schéma kamery a umístění rámových značek je na obr. 6.4. Rovinnost filmu je zabezpečena přisátím filmu podtlakem k rovné desce. Objektivy mají ohniskové vzdálenosti 9, 15, 21, 30 cm. Mimo rámových značek se na snímku zobrazí doplňková data – v současné době v digitální formě: číslo snímku, konstanta a číslo kamery, výška letu, přibližné souřadnice projekčního centra, název projektu apod.



Obr. 6.4: Schéma kamery a umístění rámových značek

V leteckých měřických kamerách jsou používány centrální uzávěrky, aby vnější a vnitřní orientace platila pro celý snímek. Štěrbínové uzávěrky tuto vlastnost nemají. Expoziční doba bývá většinou v rozsahu $1/50 - 1/1000$ sec. Nejnovější kamery jsou montovány do rámu s dvěma gyroskopy a vyrovnávacími senzory, které zabezpečují, že úhly $\varphi, \omega \leq 5^\circ$. Montáž musí rovněž zabezpečit eliminaci snosu. Snos představuje vliv větru na směr letu letadla, pro eliminaci snosu musí být kamera pootočená obr. 6.5. Kamery jsou vybaveny zařízením na eliminaci smazu – FMC (Forward motion compensation).

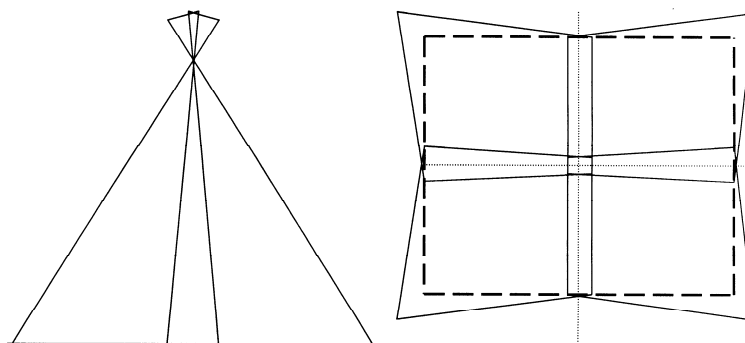


Obr. 6.5: Snos letadla

6.2 Digitální kamery

6.2.1 Digitální kamera DMC – Digital Mapping Camera

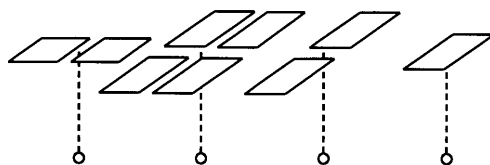
V současné době neexistuje plošný CCD prvek, který by dosahoval velikosti formátu filmu v leteckých měřicích kamerách. Tento problém je řešen v kameře DMC firmy Z/I Imaging (v letech 2000- 2001 ověřovací testy) pomocí několika snímačů. Kamera může být složena až z osmi dílčích částí. Panchromatický obraz je získáván pomocí 4 senzorů (Philips) o velikosti 7168 x 4096 pixelů (86,02 x 49,15 mm). Velikost pixelu je 12 x 12 mikrometrů. Radiometrické rozlišení je 12 bitů. Objektivy s ohniskem 120 mm mají osy záběru konvergentní. Další 4 senzory RGB+NIR 3000 x 2000 pixelů slouží pro pořízení multispektrálních snímků. Osy záběru těchto kamer o ohniskové vzdálenosti 25 mm jsou rovnoběžné. Data jsou ukládána do tří hard disků RAID, každý o kapacitě 280GB. Kamera je vybavena elektronickým kompensátorem smazu FMC, snímkování je řízeno přes GPS navigaci. Je možné připojit DGPS a IMU (inerciální měřicí jednotku) pro získání prvků vnější orientace. Před fotogrammetrickým zpracováním snímku v digitální fotogrammetrické stanici se musí snímky upravit. Nejprve vznikne tzv. normalizovaný snímek, kde jsou odstraněny vadné pixely, je eliminováno zkreslení objektivu a je provedena radiometrická korekce (jas, kontrast). V následujícím kroku je vytvořen virtuální snímek o velikosti cca 13500 x 8000 pixelů, konstanta kamery 120 mm, velikost pixelu je stejná jak na původním snímku. Delší rozměr snímku je napříč směru letu. V případě, že požadujeme barevný snímek, je nutné vytvořit barevný obraz pomocí tří pásem R+G+B nebo barevný komposit = barevný snímek+ panchromatický snímek. Jsou používány standardní formáty TIFF-JPEG. Uspořádání os záběru a složení virtuálního snímku je zřejmé z obr. 6.6.



Obr. 6.6: Uspořádání os a složení snímků u DMC

6.2.2 UltraCamD

UltraCamD představuje novou koncepci digitální kamery (poprvé představena v roce 2003). Kamera se skládá z osmi optických částí (kuželů/cones), které produkují 9 panchromatických (2+4+2+1) a 4 spektrální snímky (RGB +NIR). Ve směru letu druhá panchromatická část se čtyřmi CCD snímači poskytuje hlavní snímek (master image) a tři další slouží k doplnění mezer v hlavním snímku. Expozice všech 4 panchromatických částí jde po sobě s velmi malým zpožděním 1-2 msec, což znamená téměř stejnou fyzickou pozici projekčních center. To se označujeme jako „syntopické snímkování“, viz obr 6.7.



Obr 6.7: Syntopické snímkování

Technické parametry kamery:

Panchromatická část poskytuje výsledný snímek o velikosti 11500 x 7500 pixelů, velikost pixelu 9 mikrometru, radiometrické rozlišení 12 bitů. Geometrická přesnost složeného snímku je lepší jak 2 mikrometry. Konstanta kamery je 100 mm, clona 1/5,6. FMC je provedeno pomocí technologie TDI, smaz může být korigován až do velikosti 50 pixelů. Expoziční časy jsou v rozsahu 1/60-1/500 sec., frekvence snímání 1 snímek za vteřinu.

Multispektrální část poskytuje 3 snímky RGB +1 snímek NIR. Velikost snímku 4008 x 2672 pixelů, velikost pixelu 9 mikrometrů.

Rozměr kamery je 45 x 45 x 60 cm, váha 30 kg.

Parametry ukládací a výpočetní jednotky:

Kapacita jednotky je 1,5 TG což představuje 2775 snímků, váha 50kg. Jednotku tvoří síť 15 počítačů, které zpracovávají data již během letu. Jeden počítač slouží jako server, 13 pro jednotlivé snímače a jeden je záložní. Po přistání se stáhnou data na mobilní server s vysokou externí kapacitou disků.

Kamera je spojena s GNSS AEROcontrol firmy IGI pro určování přímé orientace snímků. Kamera je kalibrována na speciálním bodovém poli o rozsahu 3,3 x 2,2 x 2,0 m obsahující 240 bodů určených s přesností 0,05 mm. Výsledné parametry vnitřní orientace kamery jsou určeny zpracováním 84 snímků pořízených ze tří stanovisek při různých pootočeních osy záběru.

UltraCamX (obr.6.9) je novinku vycházející z UltraCamD. Hlavní změnou je menší velikost pixelu – 7,2 mikrometru, což přináší větší výsledný formát 14430 x 9420 pixelů. Multispektrální část poskytuje snímky o velikosti 4992 x 3328 pixelů. Kapacita paměťové jednotky je pak 2692 snímků.



Obr.6.8 Kamera UltraCamX

6.2.3 Středoformátové kamery

Poslední kongres ISPRS, který se konal v Istanbulu v roce 2004 představil vedle velkoformátových digitálních kamer jako jsou Ultracam D a DMC také řadu digitálních kamer středního formátu určených pro letecké snímání. Pro malé projekty nebo v případě horších finančních podmínek jsou digitálních kamery středního formátu používány zejména pro svoji pružnost a nízké náklady. Používají se dvě skupiny digitálních kamer středního formátu. První skupina představují kamery primárně navržené pro fotogrammetrické účely (např. Applanix-DSS, Rollei AIC, DIMAC) a předpokládá se jejich spojení s dalšími měřicími jednotkami nebo snímači (GPS/IMU, laserový skener). Druhá skupina vychází z klasických středoformátových kamer, kde kazeta filmu je nahrazena digitální zadní stěnou (např. Phase One H25 (22Mpix) nebo zatím největší P45 (39 Mpix, 7216x5412)), spojení s GPS/IMU se většinou nepoužívá. Kamera firmy Applanix DSS má plošný snímač 4k x 4k pixelů s velikostí pixelu 9 mikrometrů. Prvky vnější orientace jsou určovány pomocí GPS/IMU (model 410). Kamera je vybavena objektivy 35 mm nebo 55 mm. Digitální modulární letecká kamera DIMAC obr.6.9 používala snímače o velikosti 5440x4080 pixelů s velikostí pixelu 9 mikrometrů, od roku 2006 používá zadní stěnu Phase One P45. Kamera může mít 1-4 moduly. Může být vybavena objektivy s konstantou kamery 60 –150 mm a je propojena s IMU. Je vybavena elektro-mechanickým systémem pro eliminaci smazu. Může pořizovat barevné i infračervené snímky v cyklu snímek za méně jak 2 vteřiny. Paměťová jednotka 2x120 GB umožní uložit více jak 2000 snímků.



Obr. 6.9: Digitální modulární letecká kamera DIMAC

6.3 Faktory ovlivňující ostrost snímku

6.3.1 Mez rozlišovací schopnosti daná ohybem světla.

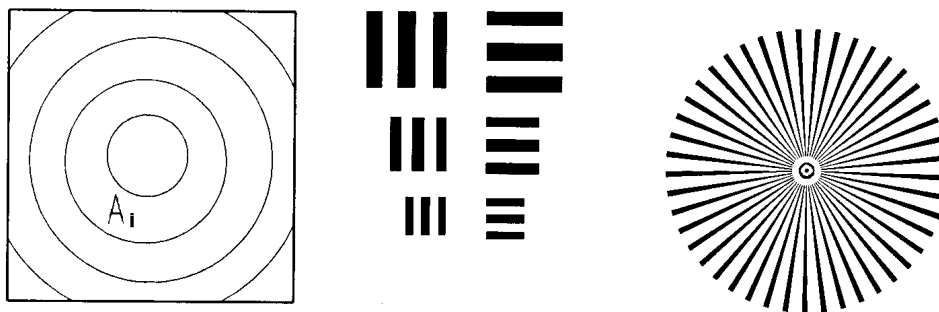
V geometrické optice se předpokládá, že ideální objektiv zobrazí předmětový bod jako bod v zobrazovací rovině. Ohyb (difrakce) vlnoplochy na vstupní pupile se projeví systémem kroužků s jasným středem. Poloměr prvního tmavého kroužku (minimum jasu) $r = 1,22\lambda \frac{f}{D}$, kde f je ohnisková vzdálenost,

D je průměr vstupní pupily, $\lambda = 0,55\mu m$ je průměrná vlnová délka světla. Abychom odlišily od sebe dva body musí být středy jejich ohybových kroužků minimálně ve vzdálenosti r (Rayleighovo kritérium). Tato teoretická hodnota nám umožní odhadnout meze rozlišovací schopnosti optického přístroje danou vlnovou podstatou světla. Pro clonové číslo $k = \frac{f}{D} = 4$ je hodnota $r = 2,7\mu m$.

6.3.2 Rozlišovací schopnost fotografické vrstvy.

Počet rozlišitelných čar na jednotku délky nám udává rozlišovací schopnost fotografické vrstvy. Rozlišíme-li 50 dvojic bílých a černých čar je rozlišovací schopnost 50čar / mm. Vysokou rozlišovací schopnost mají tenké jemnozrné vrstvy. Pod pojmem zrno rozumíme (po vyvolání filmu) shluk stříbrných molekul, které mají velikost cca $1\mu m$. Malá zrnka v emulzi snižují citlivost, rozlišovací schopnost je vysoká. Naopak vysoce citlivé materiály mají hrubší

zrno a menší rozlišovací schopnost. Film pro fotogrammetrické účely má rozlišovací schopnost cca 100 čar / mm, speciální materiály až 1000 čar / mm. Rozlišovací schopnost je závislá na kontrastu černých a bílých plošek. Rozlišovací schopnost (fotografická i optická) se testuje v laboratořích podobně jako zkreslení pomocí znaků, které mají různý rozměr, tvar a orientaci – viz obr. 6.10.



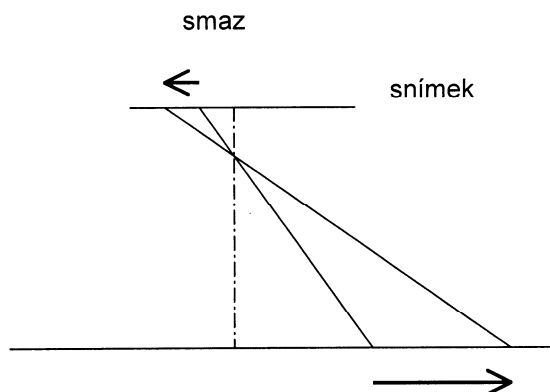
Obr. 6.10 Vzory pro stanovení rozlišovací schopnosti

Aby se zabránilo příliš optimistickým i příliš pesimistickým výsledkům používá se hodnota AWAR (Area Weighted Average Resolution). Celý obraz je rozdělen na dílčí plochy A viz obr. 6.10 vlevo, kde je zjištěna rozlišovací schopnost R. Větší rozlišovací schopnost je uprostřed snímku (60-100), menší u kraje snímku (30-60). Výsledná hodnota rozlišení AWAR je dána váženým průměrem.

$$R = AWAR = \frac{\sum A_i R_i}{\sum A_i}$$

6.3.3 Smaz

Smaz vzniká v důsledku pohybu letadla během otevření uzávěrky. Bod na snímku je zobrazen jako úsečka viz obr. 6.11.



Obr. 6.11. Smaz

Teoretická hodnota smazu je závislá na rychlosti letadla, expoziční době a na měřítkovém čísle $sm = \frac{v t}{m_s}$. Jen část světelné energie se však přemění v obraz.

Na základě zkušeností se projevuje jen polovina teoretického smazu. Je-li rychlost letadla 180 km/hod., expoziční doba 1/200 sec a měřítko snímku 1:10000, pak teoretický smaz je $25 \mu m$. Kamery konstruované po roce 1983 mohou smaz kompenzovat řízeným pohybem filmu během expozice tak, aby byl bod zobrazen do stále stejného místa (FMC – Forward Motion Compensation). U digitálních kamer FMC je provedeno pomocí technologie TDI – Time Delighted Integration, která je založena na řízení vyčítání řádků.

6.4 Plánování letu

Pro plánování letu platí jednoduché geometrické vztahy viz obr. 6.12.

Měřítkové číslo snímku $m_s = h / c$, výška letu nad terénem $h = c m_s$, absolutní výška letu $Z = Z_{ter} + h$.

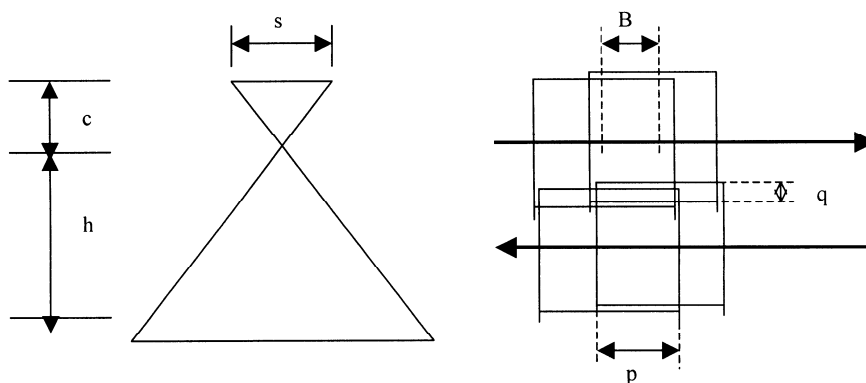
Délka fotogrammetrické základny pro p % podélném překrytu

$$B = s m_s (1 - p / 100)$$

Vzdálenost os letových sousedních řad při q % příčném překrytu

$$A = s m_s (1 - q / 100)$$

Podélný překryt bývá obvykle p = 60%, příčný překryt 25%, dříve při navigaci bez použití GPS 25 – 35 %.



Obr.6.12: Plánování snímkování

Plánování a řízení leteckého snímkování se v současnosti provádí pomocí speciálního systému. Pro plánování leteckého snímkování potřebujeme znát následující vstupní data: měřítko snímku, podélný a příčný překryt, mapu území (v digitální formě) a hranice zájmového území. Interaktivní formou se stanoví poloha letových čar, vypočtou se souřadnice a výšky projekčních center, které se přetransformují do WGS – 84. Tyto údaje se přenesou do navigačního počítače letadla, který s podporou navigačního GPS řídí provedení

leteckého snímkování. Pilot získává grafické a číselné informace o poloze letadla, expozice kamery je řízena plně automaticky počítačem v místě plánovaného projekčního centra. Souřadnice projekčního centra každého snímku se zaznamenávají do protokolu letu pro dokumentaci a analýzu letu. Volba měřítka snímku ve velké míře závisí na měřítku vyhodnocované mapy. Stanoví se na základě zkušeností nebo pomocí empirického vzorce $m_s = c\sqrt{m_k}$, kde m_k je měřítkové číslo mapy a c je konstanta. Pro $c = 200$ jsou vypočteny měřítková čísla v tab. 6.1. Pro velká měřítka map se používají mírně menší měřítková čísla z důvodu lepší identifikace objektů na snímku.

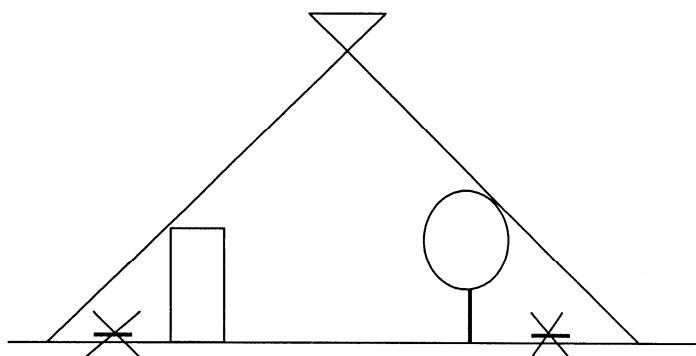
Tab. 6.1: Měřítková čísla snímku

$1:m_k$	$m_s = c\sqrt{m_k}$	Optimální m_s
1: 500	4500	3000-4000
1:1000	6300	3500-5000
1:2000	8900	6000-8000
1:5000	14000	12000-15000
1:10000	20000	20000
1:25000	32000	30000

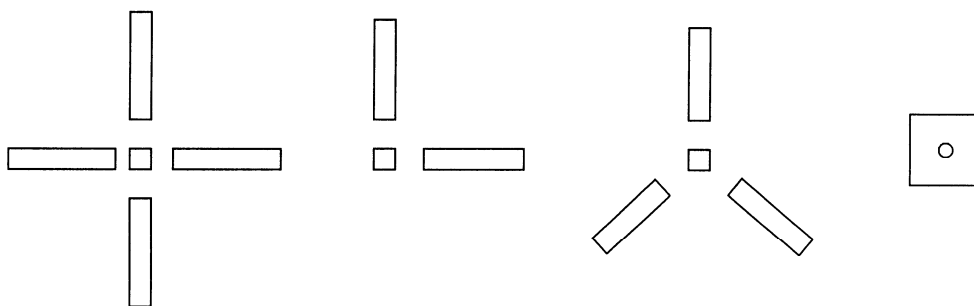
6.5 Vlčovací body v letecké fotogrammetrii

Vlčovací body jsou body zřetelně viditelné na snímku mající známé snímkové i objektové (geodetické souřadnice). Jsou přirozeně nebo uměle signalizované. Uměle signalizované body jsou stabilizované vhodným způsobem, často se využívají trigonometrické a zhušťovací body. U nových bodů určíme souřadnice geodetickou metodou s potřebnou přesností (nejméně takovou jakou očekáváme u nově určovaných bodů, u již existujících bodů je nutné z geodetických údajů zjistit, zda-li byla výška určena trigonometricky nebo nivelací (přesnost souřadnic určuje váhy ve vyrovnání). Signalizace se realizuje pomocí tenkých, většinou umělohmotných desek bílé barvy. Snažíme se, aby byl co největší kontrast mezi deskou a pozadím (teč na zelené trávě je výrazně lépe vidět než na suché trávě). Signál je možné též natřít barvou na vodorovnou střechu nebo vozovku viz obr. 6.15, na parkovišti hrozí riziko zakrytí signálu. Body umístíme v terénu s ohledem na to, aby nebyla velká šance na jejich poškození. Dobré je, když se vlčovací bod umístí v terénu tak,

aby byl zobrazen na více než dvou snímcích, ideální je na šesti snímcích (v trojnásobném překrytu dvou sousedních řad).



Obr. 6.13: Zastínění vlíčovacích bodů



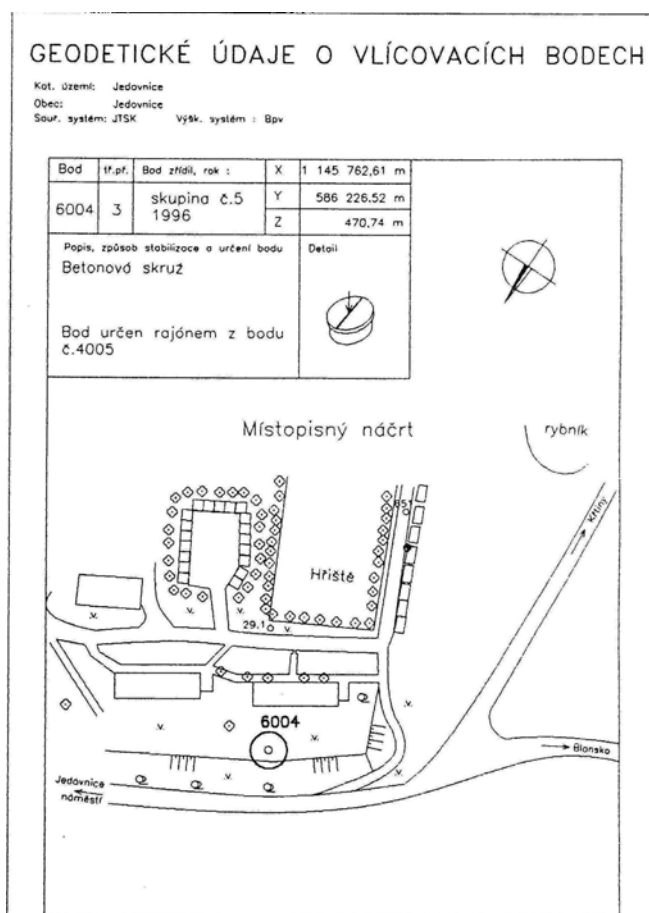
Obr. 6.14 Tvary signálů vlíčovacích bodů

Důležité je umístit vlíčovací bod tak, aby na snímku nebyl zakryt budovou nebo stromem viz obr. 6.13. Nejčastější tvary signálů jsou zřejmé z obr. 6.14. U křížových signálů je délka ramene signálu v cm $drs = m_s / 80$, šířka $šrs = m_s / 500$, délka strany čtvercového signálu $dsč = m_s / 300$. Osy ramen se musí protínat nad stabilizovaným bodem. Ramena by měla být pokud možno ve stejné výšce. Mezi signalizací a snímkováním se může provádět kontrola signalizace a opravy poškozených signálů. Někdy je výhodnější tuto činnost neprovádět a místo poškozených vlíčovacích bodů pak určit náhradní přirozeně signalizované vlíčovací body. Náhradní bod vybíráme s ohledem na měřítko snímkování. Např. pro velká měřítká $m_s \approx 3000 - 10000$, jsou vhodnými body roh dlážděného chodníku, kanalizační poklop, zděný sloupek plotu, roh vodorovné střechy garáže apod. Pro menší měřítká $m_s \approx 20000 - 30000$ roh stříšky autobusové zastávky, průsečík cest křížících se pod přibližně pravým úhlem apod. V intravilánu většinou je dostatek vhodných objektů, v extravilánu je možné použít pat sloupů elektrického vedení, zejména těch, u kterých vržený stín svírá příznivý úhel s obrazem sloupu. V nouzi pak rozhraní pozemků, malý keř apod. Důležitý je místopis náhradního vlíčovacího bodu, který je odlišný od topografií bodů polohového pole. Musí být zakresleno širší okolí s přibližnými oměrnými (stačí krokování), aby fotogrammetr mohl území identifikovat na snímku a detail objektu s uvedením místa, ke kterému je určena výška. Místopis obsahující zakres domku v ulici Lipové s uvedením

čísla popisného a několika oměrnými s přesností na cm je v případě snímku zobrazující část města s vilovou zástavbou nepoužitelnou informací pro nalezení bodu na snímku. Ukázka vhodného místopisu je na obr. 6.16. Je možná i fotografická topografie vlíčovacího bodu obr.6.17.



Obr. 6.15: Natřený vlíčovací bod



Obr. 6.16: Místopis vlíčovacího bodu



Obr.6.17: Fotografická topografie vlíčovaciho bodu.

6.6 Snímkovací letadla

Pro snímkování jsou většinou používána jedno nebo dvumotorové malá letadla. Současná technika umožňuje minimální posádku pilot + operátor nebo jen pilot. Letadlo bývá obvykle vybaveno jednou kamerou, větší letadla mohou nést i dvě kamery. Nejdůležitější vlastností letadla je výdrž letu v hodinách, ideální stav je 5-6 hodin. V případě příznivého počasí je žádoucí neztrácet čas s přistáváním, doplňováním paliva a opětovným startem. Je potřeba využít příznivých povětrnostních podmínek ke snímkování co největšího počtu snímků (snímkování více zakázek). V ČR jsou používány jednomotorové hornoplošníky Cessna 206G obr. 6.18, dvumotorové dolnoplošníky Piper Aztec a Cessna 402B obr. 6.19, 6.21, jednomotorové dolnoplošníky Z-37A Čmelák viz obr. 6.20.



Obr.6.18: Cessna 206G



Obr.6.19: Cessna 402B



Obr.6.20: Z-37A Čmelák



Obr.6.21: Cessna 402B - vnitřek s kamerou RMK

6.7 Filmy pro letecké měřické kamery.

Filmy používané ve fotogrammetrii jsou tenké a jsou proto citlivé na změny teploty a vlhkosti. Další rozměrové deformace menší velikosti vznikají při skladování filmů. Pravidelnou srážku podložky vyvolanou těmito změnami lze eliminovat matematicky pomocí afinní transformace (transformací měřených hodnot do souřadnicového systému snímku daného snímkovými souřadnicemi rámových značek), nepravidelné srážky (cca do 10 mikrometrů) nikoliv. Černobílé filmy mají jednu citlivou vrstvu o 0,01-0,02 mm silnou. Na umělohmotné podložce se nachází velmi tenká adhezivní vrstva pak citlivá

vrstva , která je na vrchu kryta ochrannou vrstvou. Vespod položky je antihalační vrstva omezující zpětný odraz světla. Barevné filmy mají tři vrstvy, každá je citlivá na jednu základní barvu (modrá, zelená, červená). Tzv. „false colour „ filmy mají rovněž tři vrstvy, z nichž jedna je citlivá na infračervené světlo. Využívají se pro tématické mapování jevů, které jsou ve viditelném spektru světla neidentifikovatelné. Citlivost filmů je udává v hodnotách EAFS (exposure aerial film speed) = ISO A. Fotografické filmy používané ve fotogrammetrii jsou nejčastěji barevné. Mezi nejvýznamnější výrobce filmů patří firma KODAK. V následujících tabulkách jsou uvedeny základní technické parametry typických filmových materiálů používaných pro mapování. Typický expoziční čas (TEČ) pro výšku letu 5000 ft (cca 1523m nad terénem) a výškový úhel Slunce 40°. Podložka pro emulzi esterová o tloušťce 0,10 mm. Tloušťka filmu 0,11- 0,14 mm. Rozlišovací schopnost (l/mm) je uvedena pro vysoký kontrast 1000:1 a nízký kontrast 1,6:1. Rozměrová změna za 1 rok při 60 % rel. vlhkosti a teplotě 25,5°C činí 0,03 mm. Teplotní koeficient roztažnosti 0,0018% na 1°C.

Černobílé filmy pro letecké snímkování (mapovací účely, průzkumné účely)

Tab.6.2 KODAK DOUBLE-X AEROGRAPHIC FILM 2405

ISO A	TEČ	RS pro 1,6:1	RS pro 1000:1	poznámka
400	1/750 při f/8	50	125	

Tab.6.3 KODAK PLUS-X AEROGRAPHIC FILM 2402

ISO A	TEČ	RS pro 1,6:1	RS pro 1000:1	poznámka
200	1/500 při f/11	55	130	Pro větší výšky letu

Barevný negativní film pro letecké snímkování

Tab.6.4 KODAK AEROCOLOR III NEGATIVE FILM 2444

ISO A	TEČ	RS pro 1,6:1	RS pro 1000:1	poznámka
125	1/750 při f/5,6	80	125	

Barevný inverzní film pro letecké snímkování

Tab. 6.5 KODAK AEROCHROM III MS FILM 2427

ISO A	TEČ	RS pro 1,6:1	RS pro 1000:1	poznámka
32	1/500 při f/4	80	100	

Barevný infračervený pro letecké snímkování

Tab. 6.6 KODAK AEROCHROM III INFRARED FILM 1443

ISO A	TEČ	RS pro 1,6:1	RS pro 1000:1	poznámka
40	1/300 při f/5,6	63	100	TEČ pro 3000m

Tento filmový materiál se používá pro tématická mapování. Používá se pro aplikace v zemědělství, lesnictví, hydrologie archeologie apod. , teplota skladování dlouhodobě -18°C . Spektrální citlivost až do 900nm. Na rozdíl od standardních barevných filmů je jedna vrstva citlivá na infračervené světlo. Výsledný obraz je v nepravých barvách („false color“) viz 6.22.



Obr.6.22: Barevný a „false color“ snímek

7 Přímá orientace snímáče

Orientace snímků je klíčovým prvkem jakéhokoliv fotogrammetrického projektu, protože určení prostorových souřadnic bodu ze snímkových souřadnic vyžaduje znalost orientace snímků. V letecké fotogrametrii je tato úloha řešena pomocí aerotriangulace. Koncem 90. let se začalo běžně používat pro určení souřadnic projekčních center kinematické metody GPS. Takto určená projekční centra můžeme považovat za vlíčovací body, které se nachází mimo mapovací prostor. Použitím GPS měření v AT jako doplňkových parametrů ve

vyrovnání je geometricky stabilní blok snímků založen jen na navazovacích bodech a pozemní vlíčovací body slouží hlavně pro kalibraci, detekci a eliminaci chyb v měření GPS (cycle slips) a pro transformaci do (mapovacího) souřadnicového systému kartografického zobrazení. V téže době začínají experimenty s inerciální měřicími jednotkami (IMU), jejichž hlavními součásti jsou gyroskopy a akcelerometry. Pomocí gyroskopů jsme schopni určit rotační prvky vnější orientace a akcelerometry poskytují údaje o rychlosti a poloze. Kombinace snímačů GPS/IMU poskytuje prvky vnější orientace pro každý snímek. Testy prováděné koncem 90. let ukázaly nejen možnosti nové technologie, ale identifikovaly zdroje chyb. Mezi ně patří Kalmanova filtraci používaná pro omezení šumu v GPS/IMU datech, parametry systematické korekce pro určení polohy a orientace snímačů a jejich stabilita v čase. S nástupem nových technologií se objevují nejasnosti v terminologii. Dříve se aerotriangulace byla popisována jako metoda pro určení polohy bodů, tedy určení souřadnic bodů bylo nejdůležitější. Takto určené body sloužily jako vlíčovací body pro absolutní orientaci modelů při mapování fotogrammetrickou metodou. Později se stalo prioritní určení prvků vnější orientace a méně důležité bylo určení souřadnic navazovacích a dalších bodů. Prvky vnější orientace mohou být určeny bez navazovacích bodů pomocí GPS/IMU technologie, stejná technologie je používána pro netradiční snímače jako jsou laserové skenery a SAR snímače. Orientace snímků je tak nahrazována obecnějším termínem orientace snímačů. Orientace snímačů zahrnuje všechny parametry bez ohledu na to, jsou-li známy či neznámy nebo jsou konstantní nebo proměnné v čase. Orientace snímačů zahrnuje soubor kalibračních parametrů snímacího systému, tj. kalibrační parametry každého senzoru. Rozlišujeme *přímou orientaci snímače* a *integrovanou orientaci snímače*. Přímá orientace snímače je určení orientace snímače bez snímkových souřadnic použitím GPS/IMU měření. Integrovaná orientace používá všechny dostupné údaje. Jsou to snímkové souřadnice navazovacích a vlíčovacích bodů, souřadnice a výšky vlíčovacích bodů a GPS/IMU měření, které ve společném vyrovnání slouží k určení všech podstatných parametrů orientace snímače. V současné literatuře jsou obě orientace, přímá i integrovaná, také nazývány jako *georeferencování* nebo *geokódování*. Oba názvy mají původ v dálkovém průzkumu. Georeferencování je používáno více v disciplínách o prostorových informacích. Ty zdůrazňují skutečnost, že orientační prvky snímače jsou obvykle produktem fotogrammetrického zpracování a výsledek - ortofotosnímky nebo vektorová data jsou potřeba mít v globálním nebo regionálním souřadnicovém systému. V dálkovém průzkumu je pojem georeferencovaný nebo geokódovaný snímek používán často jako synonymum pro ortofotosnímek. Georeferencovaný nebo geokódovaný snímek může být v dálkovém průzkumu také generován pomocí polynomičké rovinné transformace. Proto georeferencování nebo geokódování považujeme za obecnější termín, který zahrnuje různé matematické modely pro transformaci snímku do objektového prostoru. Pro zdůraznění skutečnosti, že v mapování je nutné 3D modelování snímkovacího procesu a pomocí parametrů orientace jsou určeny výsledky, preferuji používání termínu orientace snímače v případě, když mluvíme o parametrech vnější a vnitřní orientace snímku. Slovo georeferencování doporučuji pro případ určování objektových veličin z nichž 3D souřadnice může být jednou z veličin.

Inerciální měřicí jednotka (IMU) je zařízení určující svoji polohu a orientaci tím, že kontinuálně měří tři ortogonální lineární zrychlení a tři úhlové hodnoty. Teorie inerciální navigace je založena na Newtonově druhém zákoně popisujícím skutečnost, že měřená síla pohybuující ho se prostředku vzhledem k inerciálnímu souřadnicového systému může být získána jako lineární kombinace lineárního zrychlení systému a gravitačního zrychlení. Při známém gravitačním zrychlení může být lineární zrychlení tělesa vypočteno ze zjištěné síly. Tato měření jsou integrována pro získání rychlostí a lineárních zrychlení. Druhá integrace rychlostí poskytuje požadované polohové informace. Obecně jsou používány dva různé systémy: závěsné a strap down systémy. V závěsných systémech je trojice akcelerometrů namontována na vnitřní závěs tří gyroskopů. Vnitřní závěs je izolován od rotací pohybuujícího se tělesa a jeho orientace zůstává konstantní v prostoru pohybuujícího se tělesa. Tyto systémy jsou velmi přesné ale také velmi složité z mechanického hlediska a proto velmi drahé. Strap down systémy využívají akcelerometry a gyroskopy přesně uchycené k osám pohybuujícímu se prostředku. Měřiče zrychlení nejsou stabilní v prostoru, ale následují pohyb prostředku. Proto je mechanická část podstatně jednodušší a tyto systémy jsou levnější a jsou více používány. Integrace měřených dat může být dělána v lokálním souřadnicovém systému nebo v geocentrickém souřadnicovém systému. Geocentrický souřadnicový systém je výhodnější pro integraci s GPS, protože data z IMU jsou ve stejném systému jako GPS data. IMU poskytuje vysokou relativní přesnost, ale absolutní přesnost se zhoršuje s časem, běží-li přístroj v samostatném módu. V důsledku chyb závislých na čase můžeme očekávat následující přesnost: v poloze 0,5 – 1m po uplynutí 1 minuty, což při rychlosti snímkovacího letu 50m/sec představuje vzdálenost 3000m. Rotační úhly jsou za stejný časový úsek určeny s přesností cca 0,5 – 5 mgon.

7.1 Principy integrace GPS/IMU

Vysoká krátkodobá stabilita IMU je použita pro vyhlazení šumu v GPS měření. Predikovaná pozice a rychlost získaná IMU pomáhá GPS přijímači v detekci cyklických skoků (cycle slips) a překonává vypadek signálu ze satelitu. Naopak GPS má vysoce dlouhodobou stabilitu a proto jsou tato měření vhodná pro kompenzaci systematických na čase závislých chyb IMU. Integrace je možná na úrovni hardware nebo software. Software-ová integrace je používána pro nezávislý chod hardware-ových jednotek a kombinaci jejich výstupů. Data jsou předzpracována v lokálních filtrech a zpětně poskytována globálnímu filtru. Tato integrace poskytuje pružnost k připojeným dalším snímačům bez úpravy celého globálního filtru. Většinu času běží lokální filtry samostatně, avšak periodicky poskytují výstupy používané pro druhý filtr jako pseudoměření. Tento postup se nazývá jako plně decentralizovaný nebo kaskádový filtr. Inerciální měřicí jednotky (IMU) jsou zřízení schopná měřit dynamické charakteristiky pohybuujícího se objektu. Mechanickým pohybem nazýváme pohyb, při kterém se mění vzájemná poloha objektů. V případě, že rychlost pohybu těles je malá vzhledem k rychlosti světla, vychází se z Newtonových zákonů to znamená že používáme tzv. klasickou mechaniku. Základní úlohou inerciální geodézie je určení polohy, orientace a rychlosti

objektu pohybujícího se v prostoru. Poloha měřeného bodu objektu je dána vektorem v souřadnicovém systému. Souřadnicový systém považujeme za inerciální, nemění-li svoji polohu v prostoru vzhledem ke stálým. V důsledku rotace Země není možné považovat za inerciální souřadnicové systémy vztažené k Zemi. Realizace takové soustavy není možná, proto se nahrazuje kvaziinerciální soustavou, která má počátek v těžišti Země, jedna osa je totožná s osou rotace, druhá směřuje do jarního bodu. Takto definovanou souřadnicovou soustavu považujeme za inerciální s ohledem na přesnost měřících systémů.

Princip měření polohy pomocí IMU spočívá v nepřetržitém zpracovávání toku dat o pohybu objektu, tj. nepřetržité měření vektoru okamžitého zrychlení. Ten je měřen v souřadnicovém systému měřícího zařízení a musí být transformován do souřadnicové soustavy, v které chceme určovat polohu objektu. Údaje pro transformaci (úhly pootočení získáme pomocí gyroskopů). Polohu objektu můžeme definovat pomocí polohového vektoru těžiště a orientace.

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0(t - t_0) + \iint_t \vec{a} dt dt$$

Nová poloha bodu daná vektorem \vec{r} je určena pomocí výchozí polohy \vec{r}_0 , dále vektorem výchozí rychlosti a délkou časového intervalu $\vec{v}_0(t - t_0)$, a působením okamžitého zrychlení v časovém intervalu $\iint_t \vec{a} dt dt$.

V geocentrické soustavě je měřené zrychlení složeno z těchto složek

$$\vec{a} = \vec{a}_{rel} + \vec{a}_o + \vec{a}_g + \vec{a}_{Cor} + \vec{a}_{Eul}$$

kde \vec{a}_{rel} je relativní zrychlení objektu vůči Zemi, \vec{a}_o je odstředivé zrychlení, \vec{a}_g je gravitační zrychlení a $\vec{a}_{Cor}, \vec{a}_{Eul}$ jsou Coroliusovo a Eulerovo zrychlení. Součet vektoru odstředivého zrychlení a gravitačního zrychlení označujeme jako tíhové zrychlení. To není konstantní, za určitých předpokladů je můžeme stanovit. Změny v rotaci Země, precese a nutace, anomálie tíhového pole jsou faktory, které je nutno uvážit u velmi přesných měření.

Gyroskopy pro inerciální měřící jednotky by měly mít střední chybu lepší jak 0,01°/hod. Používají se různé konstrukční typy. U laserových gyroskopů na bázi skleněných vláken se využívá k určení pootočení rozdílu délky, kterou urazí dva světelné paprsky na uzavřené kruhové dráze. Druhý paprsek obíhá v opačném směru jak první.

7.2 Inerciální systémy - základní pojmy

7.2.1 Inerciální referenční systém (Inertial Reference Frame, IRF systém)

Počátek IRF je v těžišti Země, osa Z prochází póly a je totožná s rotační osou Země. Osa X je spojena s hvězdným systémem k poledníku, kde Slunce zdánlivě protíná rovník v jarním bodě. Osa Y doplňuje pravotočivou soustavu. Předpokládáme, že tento systém se vzhledem ke hvězdám nepohybuje po dobu běžného měření. Podstatné výpočetní operace jsou prováděny v ECEF systému (Earth-Centred Earth-Fixed Frame). Počátek ECEF je v těžišti Země, osa Z je identická s osou Z I-systému. Osa X prochází Greenwichem poledníkem, osa Y doplňuje pravotočivou soustavu. ECEF se otáčí vůči IRF systému během měření střední rychlostí $7,29211 \times 10^{-5}$ rad/sec.

7.2.2 Lokální referenční systém (Local Level Frame, LL-systém).

Počátek LL je v počátečním bodu měření snímače, osa Z je ve směru normály referenčního elipsoidu, osa Y je směrem na sever v místním poledníku.

7.2.3 Souřadnicový systém nosiče měřicího zařízení (Body Frame B-systém).

B-systém je souřadnicový systém tělesa nesoucího měřicí přístroje. Jestliže akcelerometry a gyroskopy konají měření v B-systému a vztah k LL systému je realizován početně, mluvíme o „strapdown“ přístupu k inerciální navigaci. Jedním ze základních úkolů jakýchkoliv inerciálních měření je vypočítat orientaci B-systému vzhledem k výpočetnímu systému ECEF ve všech epochách měření. Ve fotogrammetrických aplikacích je možná následující orientace IMU. Osa X je v podélné ose letadla ve směru letu – pootočení roll, osa Y kolmo na směr letu pootočení pitch a osa Z ve směru k zemi - pootočení yaw viz obr.

7.3 Zpracování inerciálních měření

Měření snímaná v B-systému jsou vztažena k aktuálnímu pohybu tělesa. Předpokládejme, že můžeme nějak orientovat B-systém k lokální ekvipotenční ploše s osami X,Y rovnoběžnými s LL systémem. Tíže bude obsažena jen v ose Z a může být odečtena pomocí hodnoty tzv. normální tíže. Jakékoliv zrychlení může přijít jen pohybu tělesa. Je-li zrychlení ve směru souřadnicové osy dvakrát integrováno, dostaneme souřadnicový rozdíl od začátku mise. Známe-li počáteční souřadnice středu IMU na počátku mise, můžeme použít souřadnicové rozdíly k výpočtu polohy IMU. Problém inerciální navigace spočívá v tom, že měření musí být přesně orientována k výpočetnímu systému. Není-li LL systém přesně orientován k lokální ekvipotenční ploše mohou být horizontální akcelerometry ovlivněny

gravitačním polem. Chybná integrace může pak rychle vyústit do významných chyb v poloze. Trojice gyroskopů je používána k měření změn rotací tělesa od jedné epochy k další epoše. Rotační matice je funkcí tří pootočení a protože výpočetní systém je ECEF musí být ještě opravena o pootočení mezi LL a ECEF takže výsledná orientační matice je funkcí roll, pitch, yaw a zeměpisné délky a šířky. Úhly pootočení roll, pitch, yaw získáme integrací úhlových rychlostí gyroskopů. Podobně jako u akcelerometrů mohou integrační proces ovlivnit i chyby gyroskopů.

Proces pro vypočtení počátečních hodnot roll, pitch, yaw se nazývá alignment. Integrace úhlových rychlostí gyroskopů ve výpočetním souřadnicovém systému dovoluje provádět dvojitou integraci zrychlení ve výpočetním souřadnicovém systému bez ovlivňování gravitačním polem. Přesný alignment (nasměrování) je důležitý pro používání IMU. Statické nasměrování se koná ve dvou etapách. Hrubé nasměrování je povinné, jemné nasměrování je volitelné. Jsou-li bezprostředně dostupná GPS data jemné nasměrování je ignorováno. Hrubé nasměrování vyžaduje obvykle 1-2 min. statických dat. Během hrubého nasměrování je základním signálem pro akcelerometry vektor tíže. Jemné nasměrování je proces využívající statických dat v Kalmánově filtru. U letadel není nutné provádět jemné statické nasměrování, orientační matice je dobře určena během letu do místa snímkování (skenování). Chybové modely jsou významější pro zpracování inerciálních měření než GPS měření. Kalmánův filtr požaduje variance počátečních hodnot stavového vektoru a apriorní variance šumu. Inerciální měření jsou citlivá na vstup apriorních stochastických informací. Rozlišujeme přímou orientaci snímače a integrovanou orientaci snímače (integrated sensor orientation). Přímá orientace snímače je určení orientace snímače bez snímkových souřadnic použitím GPS/IMU měření. Integrovaná orientace používá všechny dostupné údaje. Jsou to snímkové souřadnice navazovacích a vlíčovacích bodů, souřadnice a výšky vlíčovacích bodů a GPS/IMU měření, které ve společném vyrovnání slouží k určení všech podstatných parametrů orientace snímače.

Pro použití integrovaného systému (snímač+ GPS/IMU) v praxi je nutné:

- ověřit přesnost měřených orientačních parametrů,
- stanovit optimální konfiguraci bloku a počtu vlíčovacích bodů pro kalibraci integrovaného systému včetně četnosti kalibrace.

Kalibrace spočívá především ve stanovení tzv. boresight misalignment (BSMA) tj. úhlových diferencí mezi osami souřadnicových systémů GPS/IMU a kamery z porovnání výsledků aerotriangulace s přímo měřenými hodnotami prvků vnější orientace. Důležitou roli hraje vhodná konfigurace bloku. Bylo zjištěno, že pro kalibraci letecké měřické kamery s GPS/IMU je postačující nálet dvou řad, které mají 7 snímků, složitější konfigurace mají význam pro výzkumné účely. Pro zvýšení počtu nadbytečných měření se jeví vhodnější jedna řada nalétnutá z obou směrů nad lokalitou, kde je možno vygenerovat velké množství navazovacích (spojovacích) bodů. Deset vlíčovacích bodů zabezpečí dostatečně vysokou přesnost. Matematické modely pro kalibraci se liší, mimo základní varianty mající 6 prvků (3 GPS posuny a 3 úhly odchýlení) jsou používány i rozšířené modely. Dalšími parametry kalibrace mohou být korekce prvků vnitřní orientace a doplňkové parametry. Propoužívání přímé

orientace má zásadní význam stabilita kalibračních parametrů v čase, což je nutné ověřit během používání v praxi, ikdyž každý výrobce doporučuje po určité době provést kalibraci systému. Současný stav (2006) je takový, že při přímé orientaci snímače není možné stereovyhodnocení (výskyt příliš velkých vertikálních paralax u 15-20% modelů), protože přesnost rotací z IMU není vždy dostatečná. Pro účely tvorby ortofotomap, kde nejsou kladeny vždy vysoké nároky na přesnost prvků vnější orientace je možné ji použít. Integrovaná orientace snímače vylepší přesnost. Jeli použito v integrované orientaci 4-10 vlíčovacích bodů, je přesnost téměř stejná jako u konvenční aerotriangulace. Pro správné zavedení měření GPS/IMU do vyrovnání je žádoucí získat reálnou přesnost tohoto měření. Integrovaná orientace snímače bez použití vlíčovacích bodů vylepší přesnost. Doporučuje se zahrnout prvky vnitřní orientace do systému kalibrace. To neznamená že kalibrační údaje z certifikátu kamery jsou chybné. Časová nesynchronizace GPS/IMU a kamery může změnit některé parametry snímacího systému. Obecně se požaduje provést kalibraci před projektem vyžadující vysokou přesnost. V integrované metodě je možné použít méně přesného a tím i levnějšího IMU, protože orientace je podržena navazovacími body. IMU dat snižují počet vlíčovacích bodů.

Tab.7.1 Parametry nejvíce používaných systémů

parametr	P/A 310	P/A 410	P/A 510	P/A 610	AC IId
Poloha (m)	0,05-0,30	0,05-0,30	0,05-0,30	0,10	0,10
Náklony (gon)	0,013	0,008	0,005	0,0025	0,005
Pootočení	0,035	0,015	0,008	0,005	0,010

Pozn.: P/A 310 je zkratka pro výrobek firmy Applanix POS/AV model 310, analogicky další, AC IId je výrobek firmy IGI AEROcontrol II d.

7.3.1 Metoda nejmenších čtverců

U MNČ mají rovnice oprav u vyrovnání zprostředkujících měření tvar $\mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{l}$,

kde \mathbf{v}, \mathbf{l} jsou vektory oprav a měření, \mathbf{A} je matice plánu a \mathbf{x} je vektor neznámých.

za podmínky $\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} = \min.$ je vyrovnaný (odhadnutý) vektor neznámých $\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}$.

Po substituci $\mathbf{N} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})$ a $\mathbf{h} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}$

$\mathbf{x} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{h}$ a kofaktorová matice je $\mathbf{Q}_x = \mathbf{N}^{-1}$, variance $\sigma_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{m - n}$

7.3.2 Metoda nejmenších čtverců – sekvenční

Postupné-sekvenční vyrovnání předpokládá rozdělení modelu na dvě části.

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} \mathbf{l}_1 \\ \mathbf{l}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \end{bmatrix}.$$

Použijeme-li jen první část modelu, můžeme vypočítat předběžné řešení

$$\mathbf{x}_0 = \mathbf{N}_1^{-1} \mathbf{h}_1.$$

Označme $\Delta \mathbf{x}$ změnu předběžných řešení \mathbf{x}_0 způsobené přidáním dalších měření \mathbf{l}_2 .

Maticе \mathbf{N} a \mathbf{h} se skládají rovněž ze dvou částí.

Pak vztah $\mathbf{N}\mathbf{x} = \mathbf{h}$ lze přepsat do tvaru

$$(\mathbf{N}_1 + \mathbf{N}_2)(\mathbf{x}_0 + \Delta \mathbf{x}) = \mathbf{h}_1 + \mathbf{h}_2 \text{ a následovně}$$

$$(\mathbf{N}_1 + \mathbf{N}_2)\Delta \mathbf{x} = \mathbf{h}_1 + \mathbf{h}_2 - (\mathbf{N}_1 + \mathbf{N}_2)\mathbf{x}_0$$

jelikož $\mathbf{N}_1\mathbf{x}_0 = \mathbf{h}_1$, pak

$$(\mathbf{N}_1 + \mathbf{N}_2)\Delta \mathbf{x} = \mathbf{h}_2 - \mathbf{N}_2\mathbf{x}_0$$

dosazením za \mathbf{h}_2 a \mathbf{N}_2 dostaneme

$$\Delta \mathbf{x} = (\mathbf{N}_1 + \mathbf{N}_2)^{-1} (\mathbf{A}_2^T \mathbf{P}_2 \mathbf{l}_2 - \mathbf{A}_2^T \mathbf{P}_2 \mathbf{A}_2 \mathbf{x}_0)$$

$$\Delta \mathbf{x} = (\mathbf{N}_1 + \mathbf{N}_2)^{-1} \mathbf{A}_2^T \mathbf{P}_2 (\mathbf{l}_2 - \mathbf{A}_2 \mathbf{x}_0)$$

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{K}(\mathbf{l}_2 - \mathbf{A}_2 \mathbf{x}_0) \quad 1)$$

Člen $\mathbf{A}_2 \mathbf{x}_0$ je možné považovat za predikci pro měření \mathbf{l}_2 .

Změnu $\Delta \mathbf{Q}$ s ohledem na předběžnou matici \mathbf{Q}_{x0} lze získat ze vztahu

$$\mathbf{I} = \mathbf{N}\mathbf{Q}_{x0} = (\mathbf{N}_1 + \mathbf{N}_2)(\mathbf{Q}_{x0} + \Delta \mathbf{Q})$$

$$(\mathbf{N}_1 + \mathbf{N}_2)\Delta \mathbf{Q} = \mathbf{I} - (\mathbf{N}_1 + \mathbf{N}_2)\mathbf{Q}_{x0}$$

jelikož $\mathbf{I} = \mathbf{N}_1\mathbf{Q}_{x0}$, pak

$$(\mathbf{N}_1 + \mathbf{N}_2)\Delta \mathbf{Q} = -\mathbf{N}_2\mathbf{Q}_{x0}$$

$$\Delta \mathbf{Q} = -(\mathbf{N}_1 + \mathbf{N}_2)^{-1} \mathbf{N}_2\mathbf{Q}_{x0}$$

$$\Delta \mathbf{Q} = -\mathbf{K}\mathbf{A}_2\mathbf{Q}_{x0} \quad 2)$$

Matici \mathbf{K} označujeme jako matici zesílení (gain matrix) a lze ji získat dvojím způsobem 1), 2).

$$\mathbf{K} = (\mathbf{N}_1 + \mathbf{N}_2)^{-1} \mathbf{A}_2^T \mathbf{P}_2 = \mathbf{N}_1^{-1} \mathbf{A}_2^T (\mathbf{P}_2^{-1} + \mathbf{A}_2 \mathbf{N}_1^{-1} \mathbf{A}_2^T)^{-1}$$

Známe-li apriorně matici \mathbf{N}_1^{-1} , při přidání dalších neznámých do systému nemusíme počítat novou inverzi $(\mathbf{N}_1 + \mathbf{N}_2)^{-1}$, ale lze použít matici \mathbf{K} . Druhá část rovnice je výhodná tehdy, čím menší je počet měření ve druhém bloku než je počet neznámých $m_2 \leq n$.

Uděláme-li substituci $\mathbf{A}_1 = \mathbf{I}$ a $\mathbf{l}_1 = \mathbf{x}_0$, pak je model postupného vyrovnaní formulován jako

$$\mathbf{x}_0 + \mathbf{v}_1 = \mathbf{x}$$

$$\mathbf{l}_2 + \mathbf{v}_2 = \mathbf{A}_2 \mathbf{x}$$

Tento model vyjadřuje skutečnost, že předběžný výsledek výpočtu neznámých parametrů je zaveden jako do postupného vyrovnaní jako měření. Tento postup je používán v kontextu s Kalmanovou filtrací.

7.3.3 Kalmanova filtrace

Uvažujme dynamický systém jako je pohybující se těleso. Neznámé parametry jako souřadnice a rychlost tvoří tzv. stavový vektor. Tento vektor závislý na čase je predikován pro jakýkoliv okamžik pomocí systému rovnic. Predikovaná hodnota může být vylepšena nebo aktualizována měřeními obsahující informaci o některých složkách stavového vektoru. Celá procedura je známa jako Kalmanova filtrace. Ta odpovídá postupnému vyrovnaní ve statickém případě. Postupně je získáván odhad neznámých na základě všech měření až do okamžiku t . Není nutné ukládat všechna data pro následující epochy.

7.3.3.1 Predikce.

Časově závislý stavový vektor $\mathbf{x}(t)$ obsahující neznámé parametry dynamického systému může být modelován systémem diferenciálních rovnic 1. řádu

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{w}(t)$$

$\dot{\mathbf{x}}(t)$ je derivace stavového vektoru podle času

$\mathbf{F}(t)$ je dynamická matice

$\mathbf{w}(t)$ je šum (v pohybu).

Předpokládejme, že v počáteční epoše t_0 jsou známy stavový vektor $\mathbf{x}(t_0)$ a jeho kofaktorová matice \mathbf{Q}_{x0} . Obecné řešení systému diferenciálních rovnic existuje jen tehdy když dynamická matice obsahuje periodické nebo konstantní koeficienty. Řešení pak může být napsáno jako

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{T}(t, t_0)\mathbf{x}(t_0) + \int_{t_0}^t \mathbf{T}(t, r)\mathbf{w}(r)dr$$

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{T}(t, t_0)\mathbf{x}(t_0) + \mathbf{e}(t)$$

Pro vyjádření tranzitní matice \mathbf{T} jako funkce dynamické matice \mathbf{F} vyjádříme stavový vektor v čase t rozvojem Taylorovy řady.

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(t_0) + \dot{\mathbf{x}}(t_0)(t - t_0) + \frac{1}{2}\ddot{\mathbf{x}}(t_0)(t - t_0)^2 +$$

Předpokládejme konstantní dynamickou matici a při zanedbání šumu dostaneme

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(t_0) + \mathbf{F}(t_0)\mathbf{x}_0(t_0)(t - t_0) + \frac{1}{2}\mathbf{F}(t_0)^2\mathbf{x}_0(t_0)(t - t_0)^2 +$$

porovnáním s rovnicí $\mathbf{x}(t) = \mathbf{T}(t, t_0)\mathbf{x}(t_0) + \mathbf{e}(t)$ bez vlivu šumu a dostaneme

$$\mathbf{T}(t, t_0) = \mathbf{I} + \mathbf{F}(t_0)(t - t_0) + \frac{1}{2}\mathbf{F}(t_0)^2(t - t_0)^2 +$$

Kovarianční matici lze vypočítat užitím zákona o šíření kovariancí

$$\mathbf{Q}_x = \mathbf{T}(t, t_0)\mathbf{Q}_{x_0}\mathbf{T}^T(t, t_0) + \mathbf{Q}_e$$

Problém Kalmanovy filtrace je definován tranzitní matice \mathbf{T} a kofaktorové matice \mathbf{Q}_e .

7.3.3.2 Aktualizace

Stavový vektor $\mathbf{x}(t)$ může být predikován pro libovolnou budoucí epochu t systémem rovnic(2). Uvážíme-li systém šumu $\mathbf{e}(t)$ a předpokládejme, že měření $\mathbf{l}(t)$ a odpovídající kofaktory \mathbf{Q}_l jsou dostupné v čase t . Tato data mohou být vztaženy k aktualizovanému stavovému vektoru $\hat{\mathbf{x}}(t_0)$ (možno až po nutné linearizaci) pomocí rovnic $\mathbf{l}(t) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(t)$

Považujeme-li predikovaný stavový vektor $\mathbf{x}(t)$ a měření $\mathbf{l}(t)$ za stochastické veličiny dospějeme k postupnému vyrovnání

$$\mathbf{x}(t) + \mathbf{v}_x = \hat{\mathbf{x}}(t)$$

$$\mathbf{l}(t) + \mathbf{v}_l = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(t)$$

Tento systém rovnic je ekvivalentní k

$$\mathbf{x}_0 + \mathbf{v}_1 = \mathbf{x}$$

$$\mathbf{l}_2 + \mathbf{v}_2 = \mathbf{A}_2\mathbf{x}$$

a proto řešení může být vzato z rovnic postupného vyrovnání

$$\Delta\mathbf{x} = \mathbf{K}(\mathbf{l}_2 - \mathbf{A}_2\mathbf{x}_0), \Delta\mathbf{Q} = -\mathbf{K}\mathbf{A}_2\mathbf{Q}_{x_0}$$

úpravou dostaneme

$$\hat{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{x}(t) + \Delta\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(t) + \mathbf{K}[\mathbf{l}(t) - \mathbf{A}\mathbf{x}(t)]$$

$$\hat{\mathbf{Q}}_x = \mathbf{Q}_x + \Delta\mathbf{Q}_x = (\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{A})\mathbf{Q}_x$$

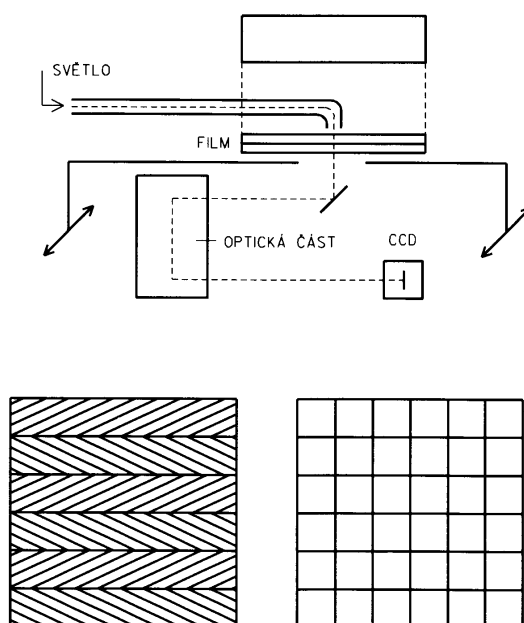
kde matice zesílení je

$$\mathbf{K} = \mathbf{Q}_x \mathbf{A}^T (\mathbf{Q}_1 + \mathbf{A} \mathbf{Q}_x \mathbf{T}^T)^{-1}.$$

8 Digitální snímek

8.1 Digitalizace obrazu

Digitalizace obrazu spočívá ve vzorkování obrazu do matice $M \times N$ bodů a kvantování jasové úrovně do k intervalů (více Bartoněk D.: Počítačová grafika). Čím jemnější vzorkování a kvantování, tím je lépe aproximován původní spojité obrazový signál. Jeden vzorkovací bod se nazývá pixel. Pixel je většinou čtvercový, kvantovací intervaly jsou obvykle stejné. Časté je použití 256 intervalů, což představuje zobrazení hodnoty jasové úrovně do 8 bitů. O četnosti hodnot jednotlivých jasových úrovní nás informuje histogram. Digitální obraz pořídíme digitální kamerou nebo skenováním analogového obrazu. Kamery i skener obsahují snímače, kde intenzita světelná energie je přeměněna na elektrický náboj a ten je dále převeden číselnou hodnotu. Digitální obraz je možné dále upravovat a to jak jasovou úroveň, tak geometrický tvar. V zahraniční literatuře se často místo hodnota jasu používají termíny intenzita nebo hodnota šedi. Pro získání digitálního obrazu z analogového média (filmu se používají speciální skenery, na které jsou kladeny mimořádné požadavky na přesnost geometrického i radimetrického zobrazení.



Obr.8.1: Schéma skeneru a postup skenování

Schéma skeneru je na obr. 8.1. Film je skenován po částech, v případě lineárního CCD snímače je snímání v řadách, v případě plošného (čtvercového) snímače po menších plošných částech filmu pokryté plošným snímačem. Skenery jsou umístěny v bezprašném, klimatizovaném prostoru se stabilní teplotou. Typickým představitelem skeneru pro fotogrammetrické účely je např. výrobek firmy Z/I ImagingPhotoscan 2002. Používá liniový třířádkový snímač, radiometrické rozlišení je 10 bitů. Velikost pixelu může být 7, 14, 28, 56, 112, 224 mikrometru. Geometrická přesnost je 2 mikrometry.

8.2 Filtry pro úpravu obrazu

Filtrace představuje změnu hodnoty jasu s cílem potlačit nebo zdůraznit některé vlastnosti obrazu. Filtry používáme pro odstranění poruch (vyhlazení, rozostření) nebo pro zdůraznění určitých prvků obrazu (hrany). Filtry můžeme dělit podle způsobu výpočtu na lineární (konvoluční) a nelineární. Konvoluce je matematická operace, která je základní operací mnoha operátorů používaných pro zpracování obrazu. Je to způsob násobení dvou polí (první pole je snímek, druhé pole je tzv. jádro (kernel)), jejichž výsledkem je pole třetí. **Konvoluce** je prováděna klouzáním jádra po snímku (většinou se začíná vpravo nahoře). Každé pozici jádra odpovídá jeden výstupní pixel, jehož hodnota je vypočtena násobením hodnot jádra s hodnotami snímku. Původní hodnota pixelu je nahrazena novou hodnotou vypočítanou jako vážený průměr z hodnot okolí pixelu. Jádro filtru je matice o malém počtu sloupců a řádků. Matematicky se konvoluce zapíše

$$\bar{g}(i, j) = \sum_{k=-m}^m \sum_{l=-n}^n g(i+k, j+l) \cdot w(m+1+k, n+1+l)$$

nebo symbolicky $\bar{\mathbf{G}} = \mathbf{G} * \mathbf{W}$

příklad: hodnota z nebo-li $\bar{g}(2,2)$ se vypočte podle výše uvedeného vzorce

$$z = am + bn + co + dp + eq + fr + gs + ht + iu$$

$$\begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m & n & o \\ p & q & r \\ s & t & u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & z & f \\ g & h & i \end{bmatrix}$$

původní obraz jádro nový obraz

8.2.1 Filtry zvýrazňující hrany

Na kvalitním snímku očekáváme nejen vyvážené rozdělení intenzit (stupňů šedi), ale i dobře definované hrany. Hrany oddělují od sebe různé objekty nebo části objektů. Jsou presentovány velkými změnami v intenzitě.

Filtry zvýrazňující hrany patří k vysokofrekvenčním filtrům (high pass) Podstata spočívá v operaci, kterou můžeme symbolicky zapsat následujícím způsobem.

Hrana = původní obraz - vyhlazený obraz

Obraz se zvýrazněnými hranami získáme

Obraz se zvýrazněnými hranami = původní obraz + hrana

Pomocí druhých diferencí hodnot intenzity zvýšíme rozdíl v intenzitách (původní obraz – rozdíl činí 10, upravený obraz 13) viz tab. 8.1.

Tab. 8.1 Zvýraznění hran

g	5	5	5	6	8	10	12	14	15	14
$\Delta g''$		0	1	1	0	0	0	-1	-2	0
$g - \Delta g''$		5	4	5	8	10	12	15	17	14

Na dvourozměrném snímku jsou druhé difference dány konvolučním operátorem (Laplace)

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Odečtením druhých diferencí od původního obrazu obdržíme operátor

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

účinek tohoto operátoru je zřejmý z příkladu

$$\begin{bmatrix} 3 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 3 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 3 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 3 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 11 & -3 & 1 & 1 & 1 \\ -3 & 11 & -3 & 1 & 1 \\ 1 & -3 & 11 & -3 & 1 \\ 1 & 1 & -3 & 11 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -3 & 11 \end{bmatrix}$$

původní obraz

nový obraz

Chceme-li hrany ještě více zdůraznit, je možné použít konvoluční operátor podobné struktury

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}, \mathbf{W} = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 17 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}, \mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ apod.}$$

Poznámka: korekční koeficient filtru (číslo před maticí) je 1/součet koeficientů nebo 1, je-li součet roven nule.

8.2.2 Vyhlašovací filtry

Pro tyto účely se používají konvoluční nízkofrekvenční filtry (low pass), které nivelizují velké lokální rozdíly mezi hodnotami pixelů. Lze jimi eliminovat poruchy, ale i rozostřovat (rozmazávat) obraz. Pomocí konvolučního operátoru níže uvedených typů lze provést vyhlazení. Čím větší je rozměr operátoru, tím je větší jeho účinek. Následující filtr počítá prostý aritmetický průměr z devíti hodnot intenzit.

$$\mathbf{W} = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Příklad s použitím výše uvedeného (průměrovacího operátoru) pro vyhlazení

$$\begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 3 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 9 & 2 \\ 2 & 2 & 4 & 1 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 3 & 3 & 3 \\ 2 & 2 & 3 & 3 & 3 \\ 2 & 2 & 3 & 3 & 3 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \end{bmatrix}$$

uživatel si může vytvořit gradientní filtry podobné následujícím vzorům

$$\begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Stejný operátor použitý pro rozmazání hran

$$\begin{bmatrix} 4 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 4 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 4 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 4 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 4 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 2 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{W} = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Tento filtr se nazývá binomický (využívá binomických koeficientů), hodnota intenzity středového pixelu má největší váhu. Vyhlazení není tak silné. V případě větší matice filtru mluvíme o Gaussově filtru (koeficienty matice odpovídají normálnímu rozdělení).

Lze také použít nelineárního filtru tzv. „uspořádaných hodnot“ (rank order), např. filtru s použitím mediánu. V rozsahu filtru se stanoví medián hodnot, který se dosadí jako nová hodnota pixelu. Použití mediánu odstraní extrémní hodnoty a může být účinnější ve vyhlazení než konvoluční filtry.

Příklad při použití mediánu

$$\begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 3 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 9 & 2 \\ 2 & 2 & 4 & 1 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 3 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \end{bmatrix}$$

Filtry, které slouží k identifikaci oblasti s velkými rozdíly hodnot pixelů v určitém směru nazýváme gradientní filtry. Většinou jsou používána dvě jádra. Každé jádro je navrženo pro detekci hrany v jiném směru (horizontální, vertikální, diagonální). Výslední hodnota pixelu je dána jako absolutní hodnota součtu absolutních hodnot obou konvolucí $|\bar{g}| = |g_1| + |g_2|$. Nejčastěji používané operátory jsou Sobelův, Prewitův a Robertsův.

Sobelův filtr

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

Prewittův filtr

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Robertsův filtr (pixelu na pozici 1,1 je přiřazena největší absolutní hodnota z obou výsledků)

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Pod pojmem segmentace obrazu rozumíme operace sloužící pro nalezení objektů v obraze. Základními kroky jsou prahování (oddělení určitých jasových hodnot pomocí prahové hodnoty) a detekce hran.

8.3 Korelace obrazů

Korelaci (míru podobnosti dvou obrazů) můžeme vyjádřit pomocí korelačního

koeficientu $r = \frac{s_{rs}}{s_r s_s} = \frac{\sum (g_r - g_r^p) \cdot (g_s - g_s^p)}{\sqrt{\sum (g_r - g_r^p)^2 \cdot (g_s - g_s^p)^2}}$

kde g_s^p, g_r^p jsou průměrné hodnoty obrazových intenzit v obrazovém okně referenčního obrazu g_r a intenzit korespondujícího obrazu g_s . V místě, kde je největší korelační koeficient se nachází hledaný obraz (např. rámová značka, vlíčovací bod). Takto nalezená poloha bodu je však určena jen přesností velikosti pixelu. Vyšší přesnost měření dosáhneme pomocí subpixelové korelace. Při subpixelové korelaci hledáme malé posuny dx, dy , o které jsou oba obrazy navzájem posunuty $g_s(x, y) = g_r(x + dx, y + dy)$.

Rovnice oprav mají tvar $v = a_1 dx + a_2 dy + g_r(x, y) - g_s(x, y)$,

kde koeficienty a_1, a_2 jsou parciální derivace funkce podle x a y (vyjadřují gradient obrazových hodnot). Pro všechny pixely zvoleného obrazového okna se sestaví rovnice oprav

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

kde \mathbf{v}, \mathbf{l} jsou vektory oprav a měření, \mathbf{A} je matice plánu a \mathbf{x} je vektor neznámých.

za podmínky $\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} = \min.$ je vyrovnaný (odhadnutý) vektor neznámých $\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}$. Po substituci $\mathbf{N} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})$ a $\mathbf{h} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}$ je $\mathbf{x} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{h}$, kofaktorová matice $\mathbf{Q}_x = \mathbf{N}^{-1}$, variance $\sigma_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{m - n}$, střední chyby neznámých dx a dy jsou $\sigma_{dx} = \sigma_0 \sqrt{q_{11}}$, $\sigma_{dy} = \sigma_0 \sqrt{q_{22}}$.

Subpixelová korelace je cca o jeden řád přesnější jak hodnota velikosti pixelu. Kvalita korelace závisí na velkých změnách (gradientech) hodnot g v obrazovém okně, kde je korelace počítána. To znamená, že hodnoty na hlavní diagonále matice normálních rovnic \mathbf{N} jsou rovněž velké. Pak hodnoty prvků q_{11}, q_{22} inverzní matice \mathbf{Q}_x budou malé a jejich střední chyby rovněž. Velikost obrazové matice ovlivňuje rovněž přesnost. Větší referenční matice zvyšuje přesnost (větší počet rovnic oprav znamená vyšší počet nadbytečných měření).

Jiný způsob řešení je následující. Při subpixelové přesnosti požadujeme maximum kontinuální korelace. Pro tyto účely stanovíme korelační funkci v oblasti s největším korelačním koeficientem. Vhodnou funkcí je polynom 2. stupně $r = \bar{r} + v = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4y^2 + a_5xy$.

Maximum funkce nalezneme tak, že parciální derivace funkce podle neznámých parametrů x, y položíme rovny nule. Získáme tak dvě rovnice pro dvě neznámé hodnoty x_{MAX}, y_{MAX} , kde korelační funkce dosahuje maximální velikosti.

$$0 = a_1 + 2a_3x_{MAX} + a_5y_{MAX}$$

$$0 = a_2 + a_4x_{MAX} + 2a_5y_{MAX}$$

8.4 Interest operátor

Jako interest operátory označujeme algoritmy pro extrakci význačných obrazových míst digitálního snímku. Takto vybraná obrazová místa – body zájmu můžeme považovat za kandidáty homologických (odpovídajících si) bodů. Jsou to matice intenzit, které jsou v ohraničeném území jedinečné a s velkou pravděpodobností se velmi podobným způsobem zobrazí i na jiném snímku (sousední překrývající se snímek). Bod se jeví jako roh, křížení hran nebo malá tečka uvnitř homogenní oblasti. Nalezení odpovídajících si bodů na dvou nebo více snímcích nazýváme přiřazení (matching). Interest operátor počítá pro každou obrazovou pozici jednu nebo více poznávacích hodnot (interest hodnot). Ty jsou porovnány se stanovenými kritérii a při jejich splnění jsou zařazeny mezi kandidáty pro přiřazení. Mezi nejpoužívanější interest operátory ve fotogrammetrii patří Förstnerův operátor.

Förstnerův operátor vychází z úvahy, že původní obrazový signál je posunut šumem.

$$g_s(x, y) = g_R(x + dx, y + dy) + v(x, y)$$

po linearizaci a zavedení přibližných hodnot $dx = dy = 0$ získáme rovnici oprav

$$v(x, y) = \frac{\partial g}{\partial x} dx + \frac{\partial g}{\partial y} dy - (g_s(x, y) - g_r(x, y)).$$

Neznámé posuny b_x, b_y určíme metodu nejmenších čtverců z normálních rovnic $\mathbf{N}\mathbf{x} = \mathbf{A}^T \mathbf{l}$.

Označíme-li $\frac{\partial g}{\partial x} = g_x$ a $\frac{\partial g}{\partial y} = g_y$, pak matice \mathbf{N} má tvar

$$\begin{bmatrix} \sum g_x g_x & \sum g_x g_y \\ \sum g_x g_y & \sum g_y g_y \end{bmatrix} = \mathbf{N}.$$

Parciální derivace představují změny hodnot intenzit ve směru souřadnicových os. Pro každý středový pixel malého obrazového okna např. 7×7 pixelů je proveden výpočet matice \mathbf{N} . Její inverzní matici \mathbf{Q} můžeme považovat za variančně-kovarianční matici, jejíž vlastní čísla λ_1, λ_2 popisují poloosy chybové elipsy. Významné znaky bodového tvaru (malá kruhovitá oblast nebo křížení hran pod vhodným úhlem) jsou signalizovány malými kruhovitými elipsami. Na hranách se vyskytují velmi protáhlé elipsy. Okna málo strukturovaná nebo s velkým šumem se projeví velkými poloosami elips. Poznávacími hodnotami jsou:

$$\text{míra velikosti elipsy } w = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} = \text{trace}(\mathbf{Q}) = \frac{\text{trace}(\mathbf{N})}{\det(\mathbf{N})}$$

$$\text{míra kruhovitosti elipsy } q = 1 - \left(\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \right)^2 = \frac{4 \det(\mathbf{N})}{\text{trace}^2(\mathbf{N})}.$$



Obr. 8.2: Vybrané body interest operátorem

Pro každé obrazové okno je vypočtena hodnota w a je nalezena střední hodnota všech hodnot w na snímku. Stanoví se vhodná prahová hodnota např. $w_p = 0,3w_{med}$. Významné znaky bodového tvaru jsou lokální minima, která jsou menší jak prahová hodnota. Druhé kritérium q je v rozsahu $(0 - 1)$. Maximální hodnoty je dosaženo, když $\sum g_x g_x = \sum g_y g_y \neq 0$. Vhodná prahová hodnota je 0,75. Förstnerův operátor lze použít i pro vyhledávání hran, v tomto případě vyhledáváme body s hodnotou q blízkou nule.

8.5 Snímkové pyramidy

Snímkové pyramidy byly zavedeny po roce 1981. Základní myšlenkou je postupná redukce rozlišení a snížení množství informací v jednotlivých úrovních snímkové pyramidy, což vede ke zvýšení rychlosti zpracování a snížení počtu operací. Rozdíl mezi snímky v nejvyšší a základní úrovni je zřejmý z tabulky 8.2.

Tab. 8.2 Snímkové pyramidy charakteristiky

<i>charakteristika/snímek</i>	<i>základní úroveň</i>	<i>nejvyšší úroveň</i>
rozlišení	vysoké	nízké
množství dat	velké	malé
detaily	mnoho	málo
přehled	špatný	dobrý
přesnost zpracování	vysoká	nízká

Velikost snímku na vyšší úrovni je redukována redukčním poměrem (ve fotogrametrii bývá redukce pravidelná) a je obvykle roven 2. To znamená, že např. ze snímku 4096 x 4096 pixelů získáme na vyšší úrovni snímek 2048 x 2048 pixelů. Hodnoty intenzity (stupně šedi) v novém snímku obvykle získáme průměrováním (z okna 2x2 pixely v nižší úrovni vypočteme hodnotu 1 pixelu ve vyšší úrovni) nebo interpolací vyššího řádu. Na hrubší úrovni rozlišení nacházíme rychle přibližné hodnoty pro startovací pozice na jemnějším rozlišení např. pro obrazovou korelaci. Pro digitalizované letecké snímky bývá použito většinou 5-6 úrovní.

9 Ortofotomapa

Ortofotomapa se skládá z ortofotosnímků, což je snímek upravený z centrální do ortogonální projekce. Na ortofotosnímku je eliminován vliv náklonu osy kamery od svislého směru a vliv výškových rozdílů mezi body v předmětovém prostoru. Povrch terénu reprodukován pomocí fototextury pomocí níž identifikujeme jednotlivé objekty. Na ortofotosnímku volíme velikost pixelu, tomu odpovídá v příslušném měřítku ortofotomapy velikost pozemního prvku. Pro výpočet ortofotosnímku potřebujeme původní digitální snímek (centrální projekce) včetně ynalosti prvků vnitřní a vnější orientace. Dále potřebujeme digitální model terénu (reliéfu) nebo povrchu (reliéf včetně budov, porostů apod.). Pro pozemní prvek, jehož poloha je dána souřadnicemi X,Y je nutné určit nejprve výšku Z z digitálního modelu terénu. V případě, že je DMT definován jako mříž (čtvercový rastr) je souřadnice Z určena interpolací z nejbližších čtyř bodů DMT.

Souřadnice Z je dána rovnicí

$$Z = a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 XY$$

Zvolíme-li v jednom bodě čtveřice bodů DMT počátek lokální souřadnicové soustavy, vzdálenost bodů (rozměr rastru) pak označme d. Souřadnice bodů

budou: P1 (X=0, Y=0), P2 (X=d, Y=0), P3 (X=0, Y=d), P4 (X=d, Y=d). Pro každý bod použité čtveřice bodů můžeme napsat rovnici popisující souřadnici Z:

$$Z_1 = a_0$$

$$Z_2 = a_0 + a_1 d$$

$$Z_3 = a_0 + a_2 d$$

$$Z_4 = a_0 + a_1 d + a_2 d + a_3 d^2$$

Neznámé koeficienty a_i určíme z předchozích rovnic jejich postupným řešením

$$a_0 = Z_1$$

$$a_1 = -Z_1/d + Z_2/d$$

$$a_2 = -Z_1/d + Z_3/d$$

$$a_3 = Z_1/d^2 - Z_2/d^2 - Z_3/d^2 + Z_4/d^2$$

Souřadnici Z pozemního prvku vypočteme $Z = a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 XY$.

Snímkové souřadnice pozemního prvku získáme z rovnic centrální projekce

Hodnoty intenzity nově vytvořeného prvku (obrazového elementu) ortofotosnímku jsou získány většinou z nejbližších čtyř pixelů původního snímku stejným způsobem jak byla určena souřadnice Z z DMT. Obrazová hodnota snímku je dána rovnicí:

$g = a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 XY$, pro nejbližší čtyři pixely jsou rovnice

$$g_1 = a_0$$

$$g_2 = a_0 + a_1 d$$

$$g_3 = a_0 + a_2 d$$

$$g_4 = a_0 + a_1 d + a_2 d + a_3 d^2$$

Neznámé koeficienty a_i určíme opět z předchozích rovnic

$$a_0 = g_1$$

$$a_1 = -g_1/d + g_2/d$$

$$a_2 = -g_1/d + g_3/d$$

$$a_3 = g_1/d^2 - g_2/d^2 - g_3/d^2 + g_4/d^2$$

Obrazovou hodnotu ortofotosnímku vypočteme ze vzorce

$$\bar{g} = a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 XY.$$

Je možné požit i metodu nejbližšího souseda, kdy převezmeme hodnotu g z nejbližšího pixelu, ale výsledný obraz je mírně rozostřený. Je možné použít interpolace vyššího stupně výrazně se však zvyšují nároky na výpočetní čas. Tento způsob výpočtu je však rovněž časově náročný, protože je tímto způsobem počítán každý obrazový prvek. Je možné tento způsob výpočtu aplikovat jen na body DMT (nepočítá se Z každého pozemního prvku) a na čtyři body mříže DMT je natransformován původní obraz. Polohová přesnost ortofotomapy se mírně zhorší v závislosti na členitosti DMT a rozměru mříže d . Obecně přesnost ortofotomapy je nejvíce závislá na kvalitě DMT.

Nepřesnost v určení souřadnice Z ovlivní výpočet snímkových souřadnic a tím dojde k posunu obrazu. Ukázka ortofotomapy se zákresem projektované komunikace viz obr.9.1.



Obr. 9.1: Ukázka ortofotomapy se zákresem projektované komunikace.

Digitální model terénu (DMT) je soubor číselných informací o terénní ploše, tedy o ploše, která je rozhraním mezi litosférou a atmosférou. Jde o soubor informací o bodech na terénní ploše a soubor pravidel, jak s nimi zacházet. Metody získání dat pro DMT jsou: fotogrammetrická metoda, digitalizace vrstevnic existujících map, laserový skener, polární metoda, radarová interferometrie a metoda používající GPS. Ve fotogrammetrii potřebujeme DMT pro výpočet ortofotosnímku. Pro tyto účely se nejvíce používají první tři uvedené metody. Body na terénu můžeme rozdělit na body s informací, nebo bez informace – hromadné body. Body s informací jsou výškové kóty, body na vrstevnici, lomové čáry (hrany) a tvarové čáry (hřbetnice, údolnice). Tyto body nelze získat u metody laserového skenování nebo radarová interferometrie, kde je však jejich neexistence nahrazena velkým počtem měřených bodů. Významné jsou zejména lomové čáry oddělující plochy s různým sklonem. Geodetické metody - polární metoda a použití GPS jsou přesné metody (2-5 cm) vhodné na menší území. Fotogrammetrická metoda je efektivní pro rozsáhlejší území, přesnost závisí na měřítku snímku (0,1-1 m). Digitalizace vrstevnic topografické mapy je rychlá metoda, přesnost 1- 3 m. Nová technologie laserového skenování umožňuje zaměření velkého počtu bodů v krátkém čase, přesnost 0,1-0,5m. Radarová interferometrie je efektivní metoda pro špatně dostupná území, kde se spokojíme s nižší přesností (z letadla 1-4 m, z družice 10-20 m).

Přesnost DMT závisí na metodě sběru dat, na hustotě bodů a metodě výpočtu. Jelikož není možné popsat rozsáhlé území jednoduchou matematickou funkcí, rozděluje se celé území na interpolační části území, kde je plocha popsána pomocí matematické funkce nebo pomocí pravidelné mřížky (grid) s výškami odvozených z matematického popisu. Matematické funkce jsou buď jednoduché rychlé interpolační metody (méně přesné) nebo přesné interpolace jako spline (plátové modely – Coons, Beziér, Ferguson), lineární predikce, metoda konečných prvků. Polynomy se příliš nedoporučují.

Aplikace DMT jsou následující: interpolace vrstevnic, tvorba profilů podél zadané čáry, mapy izolinií sklonů, mapy vektorů sklonů, tvorba digitálního ortofotosnímku, výpočet kubatur apoklesů mezi dvěma DMT, perspektivní pohledy na terénní plochu, vizualizace pomocí rastrové grafiky.

10 Digitální fotogrammetrická stanice

Vývoj digitálních fotogrammetrických pracovních stanic (Digital photogrammetric workstation) DFPS probíhal v osmdesátých letech 20. století zejména pro vojenské využití v USA pro Defence Mapping Agency. První stanice pro komerční účely se objevují na přelomu 80. a 90. let. Digitální fotogrammetrická pracovní stanice (DFPS) je interaktivní nástroj (počítač a software) pro sběr a zpracování dat pro GIS nebo CAD systémy. Digitální fotogrammetrická pracovní stanice musí být vybavena následujícím hardware. Rychlý procesor a dostatečná paměť, vysoce kapacitní disky a rychlá rozhraní, speciální dvouruční myš pro pohyb měřické značky v X,Y i Z, klávesnice, přístup k síti a periferním zařízením, zařízení umožňující stereo-vidění a zálohovací zařízení. Stanice firmy Intergraph ImageStation (2002) měla duální procesory Intel Pentium III 933Mhz, 512MB RAM rozšiřitelná na 2GB (v roce 1996 stačilo 160-200Mhz, 64-128 MB RAM). Systémový disk 36,7 GB, 2x73,4 GB datové disky, spec graf. karta 3D Wildcat 5110 AGP Pro. Pro sběr dat bylo možné použít jednodušší stanici ImageStation SSK (Stereo Softcopy Kit) jsou menší požadavky 250MHz/128MB Ram. Monitor alespoň 21". U Image Station 28" nebo 24" panoramatický monitor. Pro stereo-vidění je nutná separace snímků, jež může být dosažena

- prostorovou separací (na monitoru jsou dva snímky vedle sebe a jsou pozorovány optickým systémem)
- radiometrickou separací (anaglyf nebo polarizace, speciální polarizační zařízení před monitorem tzv. elektronický hranol + polarizační brýle)
- časovou separací (snímky jsou střídavě pozorovány pomocí speciálních brýlí)

Při časové separaci se nejčastěji používají speciální brýle firmy Crystal Eyes, které slouží jako uzávěrky synchronizované se zobrazováním levého a pravého snímku stereodvojice na obrazovce. Brýle obsahují tekuté krystaly, které fungují jako elektronická uzávěrka – propouští nebo nepropouští světlo. To znamená, že-li levý snímek na obrazovce levá optika brýlí propouští světlo. Levý a pravý snímek se musí dostatečně rychle střídát, aby pozorovatel měl stereoskopický vjem bez poruch. Pro pohodlné vidění je požadována frekvence střídání 60 Hz na snímek tj. 120Hz na monitor. Je nutný a co nejvyšší dynamický poměr (poměr mezi množstvím světla přijatých okem při otevření a uzavření. DFPS s časovou separací stereosnímků je na obr. 10.1, stanice s prostorovou separací DVP je na obr. 10.2.



Obr.10.1 Image Station



Obr.10.2 StaniceDVP

10.1 Stereovidění na DFPS

Obecně orientované snímky snímkové dvojice jsou převedeny do tzv. normálního případu, který nám umožní stereovidění. To přináší i časovou úsporu při vyhledávání sdružených bodů pomocí korelace, kdy můžeme použít jednodušší jednorozměrnou korelaci. Prostorové souřadnice bodu můžeme obdržet podle vzorce

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + \lambda \mathbf{R} \mathbf{x}, \text{ kde } \mathbf{x}^T = (x, y, -c) \text{ a } \mathbf{X}_0^T = (X_0, Y_0, Z_0).$$

Pro normalizovaný snímek obdržíme analogicky podobnou rovnici $\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + \lambda_N \mathbf{R}_N \mathbf{x}_N$. Porovnáním obou rovnic $\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + \lambda \mathbf{R} \mathbf{x} = \mathbf{X}_0 + \lambda_N \mathbf{R}_N \mathbf{x}_N$ získáme vztah pro výpočet snímkových souřadnic normalizovaného snímku $\mathbf{x}_N = \frac{\lambda}{\lambda_N} \mathbf{R}_N^{-1} \mathbf{R} \mathbf{x}$. Výsledná rovnice popisuje projektivní vztah mezi snímky. Pro výpočet prvků matice \mathbf{R}_N existují různá řešení. Hodnoty intenzity normalizovaného snímku se vypočtou z hodnot intenzit původního snímku bilineární transformací.

10.2 Software moduly DFPS

Software moduly jsou závislé na aplikacích uživatelů. Software můžeme dělit na systémový software, grafický a obraz zpracující software (zooming, rotace, převzorkování, generace snímkových pyramid, komprese dat) a fotogrammetrický software (interaktivní měření snímkových souřadnic, automatické měření snímkových souřadnic, výpočet orientací - bundle adjustment, relativní a absolutní orientace, manuální a automatický sběr dat pro DMT, generace DMT a výsledné produkty, ortofotosnímky, mozaikování). Ve fotogrammetrickém stanici jsou data ukládána podle projektů. Vstupy jsou snímky, lícovací body, údaje o kameře a další informace (např. přímo měřené prvky vnější orientace). Výstupem bývají obrazové soubory (ortofotosnímky), seznamy souřadnic, vektorové výkresy a protokoly. V porovnání s analytickými vyhodnocovacími přístroji mají DFPS následující výhody:

Integrace všech fotogrammetrických úloh do jednoho zařízení

Žádné opticko-mechanické části

Zvýšená přesnost měření snímkových souřadnic

Kontinuální sledování v celém bloku snímků

Současné vícesnímkové vyhodnocování na obrazovce

Současné stereovidění více uživatelů

Stereovidění konvergentních snímků, jsou-li převedeny do normálního případu

Barvná superimpozice ve stereovidění

Elektronický přenos dat

Nevýhody DFPS:

Množství snímkových dat. Automatizace fotogrammetrických prací byla snem pro mnoho výzkumníků posledních 50 let. Úplná automatizace není zatím reálná, významný pokrok byl však učiněn u některých úloh. Snadno automatizovatelné výpočty jsou: Vyrovnání aerotriangulace, výpočet ortofotosnímku, dále je možné provádět relativní orientaci, vyhledání bodů a hran. Obtížné je automatické rozpoznávání objektů.

Pro názornější představu o software fotogrammetrické stanice je uveden příklad pracovní stanice firmy Intergraph *Image Station*.

Základní moduly jsou:

Image Station Photogrammetric Manager (ISPM) nástroj pro řízení a organizaci dat.

Image Station Stereo Display (ISSD) nástroj zabezpečující stereovidění – přepočet snímků na normální případ

Image Station Feature Collection (ISFC) nástroj pro získávání dat (znaků) ze stereosnímků pomocí menu nastaveném uživatelem

Image Station Model Setup (ISMS) modul pro provedení a absolutní orientaci snímkové dvojice nebo orientace jednoho snímku včetně měření rámových značek

Image Station DMT Collection (ISDC) interaktivní sběr dat pro DMT.

Pokročilejší moduly slouží pro aerotriangulaci a tvorbu ortofotosnímků:

Image Station Match –AT modul pro automatickou aerotriangulaci

Image Station Match –T modul pro automatizovaný sběr dat DMT

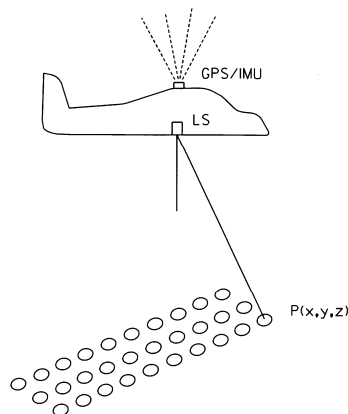
Image Station Base Rectifier je modul pro tvorbu ortofotosnímků, interaktivně nebo v dávkách

Další moduly umožní např. zpracování dat ze snímků dálkového průzkumu
modul Image Station Image Analyst.

11 Skenování systémy

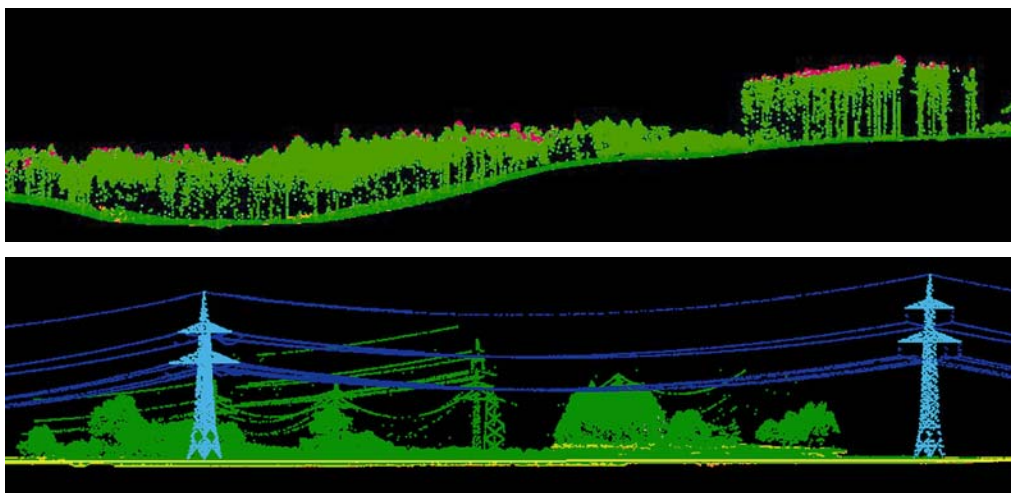
11.1 Palubní laserové systémy

Palubní laserové snímače (ALS Airborne Laser Scanning) patří k novým technologiím vyvinutým v 90. letech minulého století. Laserový dálkoměr pevně spojený s letadlem vysílá kontinuálně pulsy z laserové diody pracující v blízkém IR spektru. Vysílané paprsky tvoří mírně divergentní svazek paprsků, úhel divergence je cca 0,06 gon (průměr stopy odrazu paprsků je 90cm při skenování z výšky 1 km). Skenovací zařízení umožňuje vysílání svazku paprsků v různých směrech (rozmítání viz pozemní skenery), takže na měřeném povrchu je vytvářena souvislá řada stop eliptického tvaru obr.9.1. Laserový paprsek je odražen od zemského povrchu, část paprsků od stromů a jiných objektů. Některé laserové systémy jsou schopné rozpoznat první a poslední odraz vyslaného paprsku lze tak určovat výšku porostů. Aby byla známa poloha každého laserového pulsu je laser spojen s inerciální měřicí jednotkou (IMU) a GPS přijímačem (obvykle dvoufrekvenčním). Měřicí zařízení pracují v různých frekvencích: laser 10-50 kHz, IMU 200Hz, GPS 2-5 Hz. Kromě určení polohy bodu můžeme změřit intenzitu odraženého paprsku. Každý bod se tak stává georeferencovaným obrazovým prvkem. Aplikováním šedotónové stupnice získáme černobílý obraz území. Pokud je pořizován během letu i obrazový záznam digitální kamerou (většinou středofórmátovou) je možné spojit oba obrazové záznamy a využít je pro tvorbu ortofota.



Obr.9.1: Schéma leteckého skeneru

Na výslednou přesnost polohy bodu mají vliv jednotlivé části laserového systému. Přesnost v určení polohy pomocí GPS/IMU je cca 0,10 m (pro letadlo letící rychlostí 80m/sec s referenční stanicí vzdálenou do 50 km). Čím větší je výška letu, tím více se projeví chyby v úhlových hodnotách získaných pomocí inerciální jednotky. Přesnost rozmítání paprsku je nutno připojit k chybám IMU, v literatuře není uváděna. Přesnost laserového dálkoměru je 0,02- 0,03 m. Celková přesnost ve výšce je v rozsahu 0,1-0,5 m, polohová přesnost 0,1-1 m. V zastavěných oblastech může dojít k více násobnému odrazu paprsku. Dále přesnost délek je ovlivněna průchodem paprsku. Část paprsků z jednoho pulzu projde vegetací, část se odrazí v různých úrovních porostu. Pro eliminaci bodů, které mají měřenou vzdálenost ovlivněnou více odrazy jsou používány speciální filtry. Jelikož palubní laserové systémy neposkytují dostatek nadbytečných měření, doporučuje se mít v zájmovém území nezávislé výškové údaje. Vliv počasí je u ALS menší než u fotogrammetrického snímání. Lze skenovat pod mraky a v noci. Využití je pro tvorbu DMT a speciální mapování např. dokumentace liniových staveb – vedení vysokého napětí. Výsledkem je zaměření terénu, výšky porostů a, prostorové polohy elektrických vodičů a stožárů viz obr.9.2. Nejznámější výrobci jsou firmy OPTECH – skener ALTM 3033, LH System – skener ALS40, Riegel – skener LMS-S560, Toposys – skener LIDAR.



Obr. 9.2: Skenování porostů a vedení VN

11.2 Pozemní laserové systémy

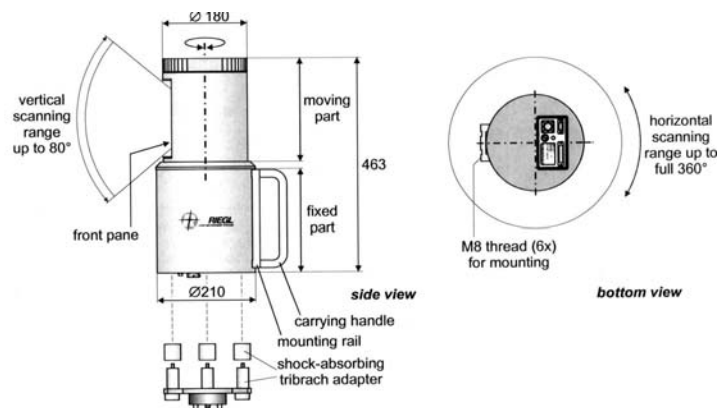
Poloha bodů je určena v lokálním souřadnicovém systému přístroje z měřených prostorových polárních souřadnic (vodorovný, výškový úhel a vzdálenost). Metody rozmítání paprsků jsou založeny na rotujícím hranolu nebo zrcadle, nebo používají rotující zrcadlo odkud jsou paprsky převedeny do soustavy optických vláken. Skenované body jsou získány v pravidelném úhlovém kroku. Rychlost skenování je menší než u leteckých skenerů, řádově 5-10 kHz. Nejsou tedy měřeny charakteristické body objektu jako u geodetických metod, charakteristické prvky (body a hrany) jsou získány až při zpracování dat. Vzhledem k velkému počtu zaměřených bodů mluvíme o mračině bodů (cloud of points). Body určené v jednom skenu jsou transformovány do geodetického souřadnicového systému pomocí prostorové podobnostní transformace pomocí lícovacích bodů (podobně jako absolutní orientace modelu v letecké fotogrammetrii). Je možné rovněž spojovat jednotlivé skeny navzájem a pak teprve je transformovat do geodetického systému. Lícovací body mohou být dvojího druhu. Používají se rovinné reflexní terče, kde jejich vysoká intenzita odrazu umožní spolehlivě identifikovat takový bod nebo jde o menší prostorové objekty charakteristického tvaru (kužel, polokoule), které je rovněž možné dobře interpretovat. Výsledkem zpracování může být drátový model objektu nebo 3D fotomodel se skutečnou (ke skeneru může být připojena digitální kamera) nebo umělou fototexturou. Dosah skenerů je závislý na odrazivosti ploch objektů. Při 80% odrazivosti (bílá omítka) je dosah 2x větší než u 40% odrazivosti (beton). Přesnost skenerů s dosahem ve stovkách metrů je 5-20 mm, u skenerů s dosahem do 10-20 m je možné dosáhnout 1-2 mm přesnosti. Nejznámější výrobci jsou firmy OPTECH, LH System, Riegel viz obr. 9.3 a 9.4, Mensi, Minolta. Praktické aplikace jsou velmi podobné aplikacím blízké fotogrammetrie:

zaměření stavebních objektů – dokumentace, fasády, měření deformací konstrukcí

zaměření lomů, skalních stěn, skládek, podzemních prostor

dokumentace památek, soch, využití v archeologii

zaměření technologických celků, potrubní systémy, trafostanice apod.



Obr. 9.3: Schéma skeneru firmy Riegel LS 420



Obr. 9.4: Skener firmy Riegl LS 420

Obr. 9.5 a 9.6 ukazují použití laserového skeneru pro zaměření minaretu v Lednicích



Obr. 9.5: Lednický minaret – měřené body na části objektu



Obr. 9.6: Lednický minaret - 3D model z laserových měření

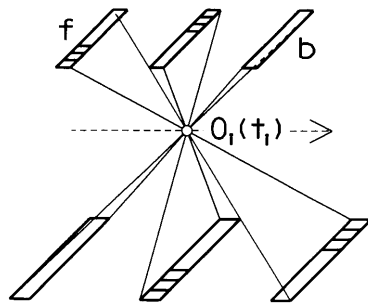
12 Řádkové snímače

Řádkové snímače nacházely uplatnění nejdříve v dálkovém průzkumu, v současné době se využívají i pro fotogrammetrické účely, zejména tvorbu ortofota.

12.1 Snímač LH SYSTEMS ADS 40

Snímač byl vyvinutý pro fotogrammetrické mapování a dálkový průzkum firmou LH Systems v roce 1998. Využívá dopředného, nadírového a zpětného záběru lineárních polí (forward-, nadir-, backward-looking) k tvorbě snímku ve tvaru pásu pro každý záběr. Používá CCD lineárních polí, které mají 12000 pixelů. Využívá tzv. tří-řádkového principu. Tři panchromatické snímače poskytují geometrii, ostatní multispektrální informace.

Třířádkový princip spočívá v získání tří záběrů viz obr. .10.1.



Obr. 10.1: Třířádkový snímač - princip

Ve fokální rovině kamery se nachází tři panchromatické řádky a 5 multispektrálních (RGB+NIR1+NIR2). Panchromatické řádky jsou složeny ze dvou polí, navzájem posunutých o polovinu pixelu. Rovinnost polí je lepší jak 10 mikrometrů. Fokální rovina je větrána, aby se zabránilo kondenzaci vodních par a teplotně stabilizována. Výsledný záznam má 8 bit radiometrické rozlišení s 3x24k (pan) + 5x12k (multi). Systém kamery se skládá z kamerového počítače (zpracovává data, řídící jednotka), hromadného paměťového systému, elektroniky pro určení polohy a orientace (GPS/IMU) a interface pilota a operátora (uživatelská řídící jednotka). Data jsou ukládána rychlostí 40MB / sec ve dvou modech, JPEG a bezztrátová komprese. Velikost paměti je 500GB. Polohový a orientační systém je speciálně vyvinutý firmou Applanix Corporation.

Technické parametry kamery jsou:

Konstanta kamery 62,5 mm, velikost pixelu 6,5 μm .

Úhel záběru napříč dráho letu je 46°, úhel mezi záběrem vpřed a nadirem je 26°, úhel mezi záběrem vzad a nadirem 16°. Vlnové délky multispektrálních pásem jsou: Red 608-662 nm, Green 533-587 nm, Blue 428-492 nm, NIR1 703-757 nm, NIR2 833-887 nm.

12.2 STARIMAGER SI 250

STARIMAGER SI 250 je palubní 3-řádková digitální kamera mající 14400 pixelů v každém lineárním CCD snímači, velikost pixelu je 5 μm , konstanta kamery je 60 mm. Byla vyvinuta firmou STASRLABO Corporation ve spolupráci Tokijskou universitou v roce 2000 pro získávání stereosnímků a multispektrálních snímků pro velkoměřítková mapování, 3D modelování městských území a pro aplikace dálkového průzkumu. Později se k vývoji připojila ETH Zürich. Letecký skener (TLS) může poskytnout panchromatické, multispektrální a hyperspektrální snímky. Vlnové délky multispektrálních pásem jsou: Red 608-662 nm, Green 533-587 nm, Blue 428-492 nm, NIR1 703-757 nm, NIR2 833-887 nm. Stejný bod na povrchu je skenován pomocí dopředného, zpětného a nadirového snímače v různém čase. Úhel záběru napříč dráho letu je 46°, úhel mezi záběrem vpřed a nadirem je 26°, úhel mezi záběrem vzad a nadirem 16°. Získáme tak tři snímkové pásy se 100% překrytem. Podobně jako rámové kamery TLS vyžaduje geometrickou, spektrální a radiometrickou kalibraci a přesné určení prvků orientace, protože tyto parametry přímo ovlivňují přesnost mapování. Systém se skládá z GPS přijímače, řídicího systému stabilizujícího orientaci, snímkovacího systému, systému předzpracovávajícího data, ukládacího systému, systému

zpracovávajícího data a systému pro analýzu a zobrazení snímků. Čtyři snímačové sestavy jsou umístěny v ohniskové rovině kamery. Každá sestava má tři snímače generující RGB obrazy. Čtvrtá sestava je řádkový snímač citlivý na NIR umístěný mezi sestavy nadírového a zpětného záběru. Přímé určení prvků orientace se děje pomocí GPS/IMU. V současné době je již možné zpracovávat tyto snímky na standardní fotogrammetrické stanici Image Station.

13 Závěr

Mým pedagogickým vzorem jsou učebnice nedávno zemřelého prof. Krause z TU Wien. Při tvorbě tohoto studijního podkladu jsem se snažil postihnout teoretické základy současné digitální fotogrammetrie. Fotogrammetrická technologie popsána stručně. Poslední dvě kapitoly jsou věnovány stručně novým progresivním technologiím. Pro udržení znalostí aktuálního stavu je nezbytné průběžné sledování informací z konferencí, časopisů a www stránek předních universit (doporučuji zejména německé TU v Mnichově, Stuttgartu, Hanoveru). Problematická je terminologie, v řadě pojmů není ujasněn český ekvivalent, proto jsou v závorce někdy uvedeny běžně používané anglické termíny.

14 Seznam použité literatury

[1] Kraus K. *Photogrammetrie*. Walter de Gruyter, Berlin 2004

[2] Kraus K. *Photogrammetry*. Dümmler, Bonn 1997



14.1 Odkazy na další studijní zdroje a prameny

S ohledem na permanentní změny a rychlý vývoj v oblasti fotogrammetrie a skenování je nutné prameny v elektronické podobě vyhledávat na internetu zadáním klíčových slov a názvů firem.



Nejznámější výrobci :

GPS/IMU: [www. applanix.com](http://www.applanix.com), www.igi.com

Laserové skenery: [www. calidus.de](http://www.calidus.de), [www. riegel.com](http://www.riegel.com), www.poposys.com,
[www.optech. com](http://www.optech.com),

Komplexní řešení: [www. intergraph.com](http://www.intergraph.com), [www. gi.leica-geosystem.com](http://www.gi.leica-geosystem.com),
[www. microsoft.com](http://www.microsoft.com) (včetně vexcelu),