

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

Ústav geodézie

Ing. Vlastimil Hanzl, CSc.

**Neměřické a semiměřické kamery
v blízké fotogrammetrii**

TEZE HABILITAČNÍ PRÁCE



BRNO 1999

ISBN 80-214-1135-X

OBSAH

| | |
|--|----|
| AUTORŮV ŽIVOTOPIS | 4 |
| 1. ÚVOD | 5 |
| 2. MATEMATICKÉ MODELY | 6 |
| 3. KALIBRACE NEMĚŘICKÝCH A SEMIMĚŘICKÝCH KAMER | 11 |
| 4. PROJEKT CIPA | 14 |
| 5. PROGRAMOVÝ SYSTÉM DMU | 17 |
| 6. ZÁVĚR | 18 |
| 7. LITERATURA | 19 |
| 8. ABSTRACT | 21 |

Vlastimil Hanzl se narodil 1. 9. 1953 v Brně. Po absolvování studia oboru geodézie a kartografie na stavební fakultě VUT v Brně v roce 1977 nastoupil do Geodézie n.p. Brno do provozu speciálních prací. Na katedru geodézie přišel koncem roku 1979 a postupně se orientoval do oblasti fotogrammetrie. Kandidátskou disertační práci „Analytické metody blízké fotogrammetrie“ obhájil v roce 1985. V současné době se věnuje zejména speciálním aplikacím fotogrammetrie.

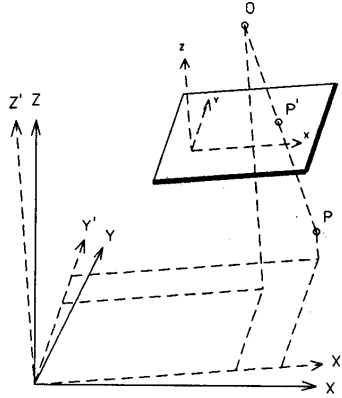
1. ÚVOD

Fotogrammetrie je věda a technika, která se zabývá určováním polohy a tvaru objektu ze snímků. Hlavní těžiště fotogrammetrických prací leží v letecké fotogrammetrii sloužící především k tvorbě topografických a účelových map. Speciální aplikace fotogrammetrie, kdy většinou snímáme ze vzdálenosti menší než 300 m, patří do blízké fotogrammetrie. Jeden z nejvýznamnějších vývojových skoků ve fotogrammetrii byl pravděpodobně inicializován H. Schmidem, (spolupracovník W. von Brauna), který pracoval v letech 1952–1955 v Laboratoři balistického výzkumu v USA [17]. Hluboké teoretické znalosti a monopol výpočetní techniky umožnily rychlý přechod od klasické analogové techniky k analytickému řešení. Přístup k americkým výzkumným zprávám a dostupnost výkonné výpočetní techniky způsobily mohutný rozvoj analytické fotogrammetrie. Jeden z nejvýznamnějších referátů na 12. Kongresu ISP (International Society of Photogrammetry) v roce 1972 v Ottawě byl od Bauera a Müllera „Svazkové vyrovnání s doplňkovými parametry“. Toto řešení výrazně zvýšilo přesnost snímkových triangulací a umožnilo používat pro fotogrammetrická měření i snímky z neměřických kamer. V sedmdesátých a osmdesátých letech bylo pro účely blízké fotogrammetrie vyvinuto množství matematických modelů doplňkových parametrů eliminující zejména radiální zkreslení objektivu a bylo testováno velké množství různých neměřických kamer. Konstrukce kamer malého a středního formátu s vestavěnou mřížkou (reseau) Rollei, Leica v osmdesátých letech znamená další výrazný posun k eliminaci jednoho z limitujících faktorů – deformace filmu. Tyto semiměřické kamery stále více nahrazují klasické měřické kamery pro svoji větší operativnost a nižší cenu. Habilitační práce je orientována na aktivity autora v letech 1991–1998. V práci jsou uvedeny poznatky s kalibrací neměřických a semiměřických kamer. Zkušenosti s vývojem software pro blízkou fotogrammetrii a jeho testování při zpracování neměřických snímků pořízených z malých výšek z rádiem řízených modelů přispěly k tvorbě systému pro fotogrammetrickou dokumentaci místa události používaný u Policie ČR. Možnost pracovat s programovým systémem ORIENT (TU Wien) umožnilo rozšíření studijních a testovacích prací a účasti na mezinárodním projektu CIPA.

2. MATEMATICKÉ MODELY

2.1 Podmínka kolinearity

Snímky pro fotogrammetrické účely můžeme považovat s určitou přesností za centrální projekci prostorových objektů. Vztah mezi snímkovými a objektovými souřadnicemi bodu 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. 2.1. Podmínku kolinearity vyjadřují rovnice



Obr. 2.1

$$\frac{x - x_0}{c} = \frac{X' - X'_0}{Z' - Z'_0} \quad \frac{y - y_0}{c} = \frac{Y' - Y'_0}{Z' - Z'_0} \quad (2.1)$$

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

$$\begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X' - X'_0 \\ Y' - Y'_0 \\ Z' - Z'_0 \end{bmatrix} = m \mathbf{R} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Maticе rotace \mathbf{R} vznikne součinem tří dílčích matic rotace $\mathbf{R} = \mathbf{R}_\omega \mathbf{R}_\varphi \mathbf{R}_\kappa$ (2.3)

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

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

Vynásobíme-li rovnici (2.2) maticí \mathbf{R}^T a uvážíme-li, že $\mathbf{z} = \mathbf{0}$, $z_0 = c$ dostaneme po úpravě zobrazovací rovnice

$$\begin{aligned} x - x_0 &= -c \frac{(X - X_0)r_{11} + (Y - Y_0)r_{21} + (Z - Z_0)r_{31}}{(X - X_0)r_{13} + (Y - Y_0)r_{23} + (Z - Z_0)r_{33}} = F(x) \\ y - y_0 &= -c \frac{(X - X_0)r_{12} + (Y - Y_0)r_{22} + (Z - Z_0)r_{32}}{(X - X_0)r_{13} + (Y - Y_0)r_{23} + (Z - Z_0)r_{33}} = G(y) \end{aligned} \quad (2.4)$$

2.2 Metoda svazkového vyrovnání (bundle adjustment)

Souřadnice bodů, prvky vnitřní a vnější orientace můžeme určit vyrovnáním. Linearizací rovnic (2.4) získáme rovnice oprav (pro bod i a snímek j)

$$\begin{aligned} v_{x_{ij}} &= a_1 dx_{0j} + a_2 dc_j + a_3 d\omega_j + a_4 d\varphi_j + a_5 d\kappa_j + a_6 dX_{0j} + a_7 dY_{0j} + a_8 dZ_{0j} + \\ &+ a_9 dX_i + a_{10} dY_i + a_{11} dZ_i + (x_{ij}^0 - x_{ij}^m) \end{aligned} \quad (2.5)$$

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

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

$$a_1 = \frac{\partial F}{\partial x_0} \text{ atd.}$$

V maticovém zápisu mají rovnice oprav tvar $\mathbf{v} = \mathbf{A} \mathbf{dx} + \mathbf{l}$. Za podmínky $\mathbf{v}^T \mathbf{v} = \min$ získáme normální rovnice $\mathbf{0} = \mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{dx} + \mathbf{A}^T \mathbf{l}$. (2.6)

Vypočtené neznámé \mathbf{dx} připočteme k přibližným hodnotám prvků orientace a souřadnic bodů. Výpočet se opakuje do splnění kritérií pro ukončení iterací. Považujeme-li některé vyrovnávané parametry za měřené, můžeme doplnit rovnice oprav.

$$\begin{aligned}
v_{x_0} &= dx_0 && + (x_0^0 - x_0^k) \\
v_{y_0} &= dy_0 && + (y_0^0 - y_0^k) \\
v_c &= dc && + (c_0^0 - c^k)
\end{aligned} \tag{2.7}$$

$$\begin{aligned}
v_X &= dX && + (X^0 - X^G) \\
v_Y &= dY && + (Y^0 - Y^G) \\
v_Z &= dZ && + (Z^0 - Z^G)
\end{aligned} \tag{2.8}$$

Rovnice (2.7) jsou pro měřené prvky vnitřní orientace, rovnice (2.8) pro souřadnice vřícovacích bodů.

2.3 Hlavní faktory omezující přesnost fotogrammetrických měření

Hlavní faktory omezující přesnost fotogrammetrických měření zejména u neměřic-kých kamer jsou systematické chyby zahrnující deformace filmu ve snímkové rovině a zkreslení objektivu. U filmu se jedná zejména o nerovinnost filmu. Nerovinnost filmu je nebezpečná zejména u kamer s širokouhlými objektivy na okraji snímku. Ta je způsobena tím, že neměřické kamery nejsou konstrukčně speciálně upraveny pro zabezpečení rovinnosti filmu. Tento nedostatek lze eliminovat pomocí polynomu třetího stupně (2.10) [9] nebo částečně pomocí doplňkových parametrů (2.11–2.15).

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^i \begin{bmatrix} a_{ij} \\ b_{ij} \end{bmatrix} x^{i-j} y^j \tag{2.10}$$

Eliminaci zkreslení objektivu bylo věnováno velké úsilí řady odborníků [2], [4], [5], [6], [7], [8], [20], [21] a jiní. V těchto pracích jsou uváděny obvykle následující polynomy pro eliminaci distorze

$$\begin{aligned}
dx_0(x, y) &= x(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2 xy \\
dy_0(x, y) &= y(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + P_2(r^2 + 2y^2) + 2P_1 xy
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Velmi podrobně je tato problematika zkoumána v [20]. Devět často používaných matematických modelů pro odstranění vlivu zkreslení bylo testováno. Nejlepší srovnatelné výsledky poskytly následující modely

$$\begin{aligned}
dx_0(x, y) &= a_1x + a_2y + a_3xy + a_4y^2 + a_5x^2y + a_6xy^2 + a_7x^2y^2 + \\
&+ \frac{x}{c} \left((a_{13}(x^2 - y^2) + a_{14}x^2y^2 + a_{15}(x^4 - y^4)) + x(a_{16}r^2 + a_{17}r^4 + a_{18}r^6) \right) \\
dy_0(x, y) &= a_8xy + a_9x^2 + a_{10}x^2y + a_{11}xy^2 + a_{12}x^2y^2 + \frac{y}{c} \left((a_{13}(x^2 - y^2) + \right. \\
&+ a_{14}x^2y^2 + a_{15}(x^4 - y^4) \left. \right) + y(a_{16}r^2 + a_{17}r^4 + a_{18}r^6) \quad (\text{Brown}) \quad (2.12)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
dx_0(x, y) &= x(K_1r^2 + K_2r^4) + (P_1x + P_2y + P_3xy + P_4y^2) \\
dy_0(x, y) &= y(K_1r^2 + K_2r^4) + (P_5xy + P_6x^2) \quad (\text{Murai}) \quad (2.13)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
dx &= b_1x + b_2y + b_3xr^2(1 - r_0/r) + b_4xr^4(1 - r_0/r) + b_5xr^6(1 - r_0/r) + \\
&+ b_62xy + b_7(r^2 + 2x^2) + x_0 \\
dy &= b_1y + b_2x + b_3yr^2(1 - r_0/r) + b_4yr^4(1 - r_0/r) + b_5yr^6(1 - r_0/r) + \\
&+ b_72xy + b_6(r^2 + 2x^2) + y_0 \quad (\text{Sälmenperä, Kilpelä}) \quad (2.14)
\end{aligned}$$

Programový systém ORIENT [16] používá více než dvě desítky doplňkových parametrů pro eliminaci zkreslení sestavených do obecného polynomu, v němž je možné volit různé kombinace koeficientů, původní model má tvar

$$x_0 = x_0 + dx_0(x, y) = x_0 + \sum (a_i \cdot dx_{0i}(x, y))$$

$$y_0 = y_0 + dy_0(x, y) = y_0 + \sum (a_i \cdot dy_{0i}(x, y))$$

$$\begin{aligned}
dx_0(x, y) &= a_3x(r^2 - 1) + a_4x(r^4 - 1) + a_5(r^2 + 2x^2) + \\
&+ a_62xy + a_7(-x) + a_8(-y(x^2 - y^2))/r^2 + \\
&+ a_9(-2xy^2)/r^2 + a_{10}xy + a_{11}y^2 + a_{12}x^2y + a_{13}xy^2 + a_{14}x^2y^2 \\
dy_0(x, y) &= a_2y + a_3y(r^2 - 1) + a_4y(r^4 - 1) + a_6(r^2 + 2x^2) + \\
&+ a_6(r^2 + 2x^2) + a_52xy + a_7y + a_8x(x^2 - y^2)/r^2 + \\
&+ a_9(-2x^2y)/r^2 + a_{14}xy + a_{16}x^2 + a_{17}x^2y + a_{18}xy^2 + a_{19}x^2y^2 \quad (2.15)
\end{aligned}$$

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.

Volbu přiměřeného matematického modelu výstižně popsali [11]. 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 nepodlehnout pokušení použít velké množství parametrů v zájmu co nejrealističtějšího modelu. Velký počet doplňkových 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 členy z rovnice (2.11), přidáním dalších parametrů se přesnost zvýší jen nepatrně [4], [8]. Podobné závěry vyplynuly i z experimentů uvedených v [13]. Tuto skutečnost potvrzují i novější experimenty s digitálními kamerami [7], [21].

2.4 Použitý software

V experimentech byly použity programový systém ORIENT (TU Wienn) a program ABF2 [12], oba založené na svazkovém řešení. Programový systém ORIENT umožňuje zpracovávat různé druhy měření a parametrů současně. Při vyrovnání obecně mohou být tyto neznámé: prostorové souřadnice vřícovacích bodů, prostorové souřadnice bodů objektu, prvky vnější orientace, prvky vnitřní orientace a doplňkové parametry. V některých případech určujeme jen prvky vnější orientace (resection), kdy prostorové souřadnice vřícovacích bodů jsou neměnné. Prvky vnitřní orientace a doplňkové parametry mohou být jako neznámé. Další možností je jen určení prostorových souřadnic bodů objektu (intersection), ostatní parametry se nemění. Universálnost ORIENTU do-
svědčuje možnost použití modelových souřadnic a fiktivních měření (body jsou na přímce, rovině) při speciálních úlohách. Program ABF2 byl použit pro software DMU-1 pro Policii ČR v dvou variantách [3].

3. KALIBRACE NEMĚŘICKÝCH A SEMIMĚŘICKÝCH KAMER

Měřická kamera je kamera projektovaná pro měřické účely, jejíž prvky vnitřní orientace jsou stabilní a jsou známy s vysokou přesností. Neměřická kamera je kamera, jejíž prvky vnitřní orientace jsou nestabilní a jsou úplně nebo částečně neznámy. Semiměřické kamery vyplňují prostor mezi měřickými a neměřickými. Většinou jsou to kamery se skleněnou destičkou s reseau v rovině snímku. Pomocí křížků mřížky (reseau) je eliminována podstatně deformace filmu. Jestliže jsou prvky vnitřní orientace a zkeslení určeny kalibrací, blíží se semiměřické kamery svojí kvalitou měřickým kamerám (např. kamery Rollei 3003 a Rollei 6006). Protože prvky vnitřní orientace u neměřických nebo semiměřických kamer jsou nestabilní, před řešením úlohy je výhodné znát prvky vnitřní orientace a při existenci zkeslení stanovit vhodný matematický model (doplňkové parametry) pro jeho eliminaci. Při vyrovnání znalost prvků vnitřní orientace a doplňkových parametrů umožňuje postupovat rychleji a s větší jistotou eliminujeme odlehle hodnoty v měření snímkových souřadnic. 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 (min. 30–40 bodů), pro spolehlivé stanovení doplňkových parametrů. Snímky je potřeba pořídít z několika různých stanovisek s optimální geometrií (konvergentní), vhodné je z jednoho stanoviska pořídít dva až tři snímky. V roce 1994 byla provedena kalibrace 6 kamer Praktika BX 20 pro Policii ČR, okresní ředitelství Liberec. Pět kamer bylo vybaveno objektivy s nominální ohniskovou vzdáleností 50 a 28 mm, jedna kamera 50 a 20 mm. Vzhledem k používanému účelu a dosažených středních jednotkových chyb po vyrovnání (10.1–12.4 μm) byly stanoveny jen prvky vnitřní orientace bez doplňkových parametrů. Bylo zjištěno, že skutečná konstanta kamery je i po korekci pro zaostření na nekonečno odlišná od nominální hodnoty a jednotlivé objektivy se od sebe liší v rozsahu 28,45–28,72 mm a 51,56–52,46 mm. Podobně je tomu u polohy hlavního bodu při srovnání normálního a širokouhlého objektivu u jedné kamery, i když zde svoji roli sehraje korelace s prvky vnější orientace $\omega a \varphi$. Tuto skutečnost je potřeba uvážit vždy při řešení úloh, kdy použijeme neměřickou nebo semiměřickou kameru a podle toho opatrně stanovit vstupní data pro kameru. Přesnost uvedená je pro dané účely (systém DMU) plně vyhovující, protože kamery jsou používány v blízkém prostoru a měření snímkových souřadnic je prováděno na zvětšenině snímku pomocí tabletu.

3.1 Kalibrace kamer Pentacon Six

Speciální kamery pro blízkou fotogrammetrii (Rollei, Leica) jsou velmi drahé. Po předchozích zkušenostech s maloformátovými kamerami byla v roce 1992 zakoupena starší kamera Pentacon Six s objektivem Biometar 2.8/80, do které byla vestavěna mřížka (sklo tl. 1,6 mm) mající 3×3 křížky ve vzdálenosti 22,5 mm. Velikost křížků byla 2×2 mm a čárky byly 0,035 mm široké. Mřížka byla vyhotovena speciální technologií FE VUT v Brně. Kamera byla kalibrována na bodovém poli o velikosti 5,7×2,6×2,2 m vybudovaném v laboratoři ústavu geodézie. Přesnost vlíčovacích bodů určených protíná-

ním vpřed byla 0,7 mm v každé souřadnici. Pro výpočet byl použit programový systém ORIENT. Bylo vytipováno 6 různých matematických modelů pro eliminaci zkreslení objektivu. Model A je bez doplňkových parametrů, model B obsahuje parametry $i = 3, 4, 5, 6$, model C obsahuje parametry $i = 8, 9$, model D obsahuje parametry $i = 3, 4, 8, 9$, model E obsahuje parametry $i = 10-13, 15-18$, model F obsahuje parametry $i = 3, 4, 13, 17$. Jednotlivé parametry pro modely byly vybírány na základě zkušenosti z předchozích experimentů.

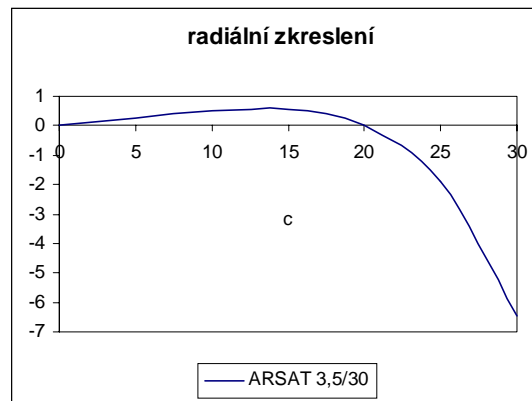
Tab. 3.1: Střední chyba σ_0 po vyrovnání v (μm)

| Film/počet snímků | A | B | C | D | E | F |
|-------------------|------|-----|------|------|------|------|
| 1/7 | 12,0 | 9,3 | 9,0 | 9,3 | 10,8 | 9,3 |
| 2/5 | 12,6 | 9,6 | 10,0 | 10,0 | 11,5 | 10,1 |
| 3/5 | 11,6 | 7,2 | 7,3 | 7,3 | 8,3 | 7,3 |

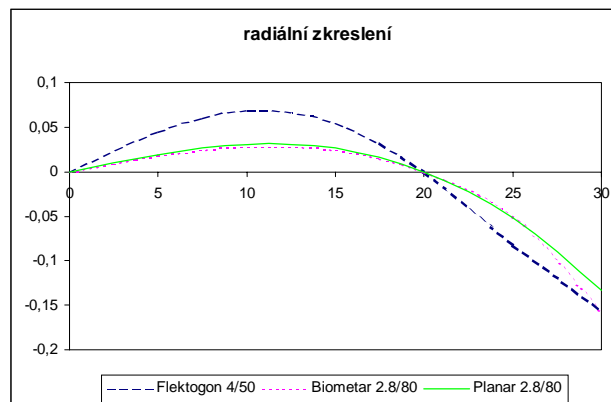
Z tab. 3.1 je zřejmé, že pro tento objektiv není příliš velkých rozdílů mezi jednotlivými modely v hodnotě střední jednotkové chyby. Zkreslení objektivu je velmi podobné objektivu Planar 2.8/80, který je použit u kamery Rollei 6006 metric použité v projektu CIPA – viz obr. 3.2. Potvrdila se i skutečnost uvedená v kap. 2.4, že jednodušší model (B,C,D) je postačující [14]. V modelu B je vliv tangenciální distorze velmi malý, nepřesahuje hodnotu $10\mu m$. Ústav fotogrammetrie na AG Krakow [15] použil stejný přístroj pro vestavění mřížky 7×7 křížků. Mřížka má podobné parametry – tl 1,5 mm, velikost křížků 1×1 mm, šířka čáry 0,040 mm. Při kalibraci bylo použito všech 49 křížků a v dalších experimentech jen 9 křížků. Přesto bylo dosaženo vysoké přesnosti ($3\mu m$), což potvrdilo můj předpoklad, že pro řadu aplikací, kde je použit pro měření fotogrammetrický přístroj a měříme na filmu, je postačující mřížka 3×3 křížků. Při použití zvětšenin snímků nebo při speciálně přesných pracích je žádoucí mít hustší síť křížků na mřížce pro co nejlepší eliminaci vlivu nerovnosti filmu. Pro stejný typ kamery avšak bez mřížky byly použity snímky prostorově členitého stavebního objektu, na kterém bylo zaměřeno 50 bodů. Snímky byly proměřeny na analytickém plotru a snímkové a prostorové souřadnice bodů byly exportovány do souborů ve formátu použitelných pro ORIENT. Byly použity objektivy: Flektogon 4/50, Arstar 3,5/30. U objektivu Flektogon 4/50 byly použity modely A a B jako u semiměřické kamery Pentacon Six. Vypočtené prvky vnitřní orientace se příliš neliší, zkreslení objektivu je podobné jako u objektivu Biometar 2.8/80 viz obr. 3.2. Zcela jiná byla situace u objektivu Arstar 3,5/30. Výpočet bez doplňkových parametrů byl ukončen při velikosti střední jednotkové chyby σ_0 cca 0,3 mm. U všech objektivů neměřických kamer, s kterými jsem kdy pracoval, nepřekročila σ_0 hodnotu 0,03 mm v případě, že nebyly použity doplňkové parametry. Při aplikaci modelu B se σ_0 výrazně zlepšila. Koefficienty a_3 a a_4 jsou větší než obvykle. Vliv tangenciálního zkreslení je menší. V tab. 3.2 jsou pro porovnání uvedeny koeficienty zkreslení obou testovaných objektivů a střední jednotkové chyby σ_0 . Průběh a velikost zkreslení je zřejmý z obr. 3.1.

Tab. 3.2: Porovnání koeficientů zkreslení a σ_0

| koeficient | Flektogon 4/50 | Arstar 3,5/30 |
|------------|----------------|---------------|
| a_3 | -2,4473 E-01 | -2,1992 |
| a_4 | 4,9388 E-02 | -1,0624 |
| a_5 | -2,6194 E-02 | -3,4021 E-02 |
| a_6 | 2,2618 E-03 | -0,8038 E-02 |
| σ_0 | 11,6 μm | 12,7 μm |



Obr. 3.1: Radiální zkreslení objektivu



Obr. 3.2: Radiální zkreslení objektivů

4. PROJEKT CIPA

Každým rokem je poškozeno válkou, ohněm, zemětřesením, záplavami a vichřicemi mnoho přírodních a architektonických památek. Jen málo z nich je dokumentováno fotogrammetrickými metodami, a proto je obtížné je rekonstruovat v původní podobě. Mezinárodní společnost CIPA předpokládá, že dokumentaci nebudou dělat jen fotogrammetři, ale i jiné zainteresované osoby. Těm je však potřeba poskytnout potřebné informace pro správné používání fotogrammetrických technologií. CIPA monitoruje a řídí současný stav fotogrammetrie v architektuře a současně vytváří síť institucí schopných provádět odborné práce, školení a expertízy. Těmto cílům sloužil i projekt „CIPA“ [1], kde jako testovací objekt byla použita stanice metra postavená významným architektem Otto Wagnerem na Karlově náměstí ve Vídni. Na stanici o rozměru 15×10×8 m bylo zaměřeno několik desítek dobře identifikovatelných bodů, které byly určeny v lokální síti s přesností 2 mm. Objekt byl snímkován devíti různými kamerami středního (6×6cm) a malého formátu (24×36 mm). Snímky byly proměřeny na různých přístrojích (komparátory, analytické plotry) a zpracovány různými software. Celkem 16 ústavů evropských universit zaslalo svoje příspěvky pro globální zpracování. Ústav pro fotogrammetrii a dálkový průzkum na TU Wien organizačně zabezpečil celou akci, na AUT Thessaloniky (Řecko) byly provedeny analýzy výsledků, což byly vypočtené souřadnice bodů na fasádě a kovarianční matice. Zpracováno bylo 107 různých řešení. Metodu bundle adjustment použilo 81 % účastníků, metodu DLT 14 % účastníků. Malý formát byl použit v 57 % řešení, střední formát pro 43 % řešení. Měřicí zařízení s přesností 1–5 μm bylo použito v 62 % řešení. Minimum vřícovacích údajů mělo 31 % řešení. Z dosažených výsledků vyplynuly následující závěry:

- Je možné dosáhnout přesnosti 1–2 cm v poloze bodu, což plně vyhovuje v architektuře, i když se použijí maloformátové neměřické kamery, jsou-li předkalibrovány nebo při použití opatrné samo- kalibrace a to i při minimu vřícovacích údajů.
- Tři hlavní faktory ovlivňující přesnost jsou: *měřítka* v souvislosti s formátem snímku, *měřická charakteristika kamery* a *měřicí zařízení*. Přesto, že disponujeme vysoce přesným měřicím zařízením, nenahradí nám přesnost zařízení ztrátu způsobenou použitím neměřické kamery s nestabilními prvky vnitřní orientace.
- Kombinované vyrovnání geodetických a fotogrammetrických měření nezlepší výsledky výrazným způsobem.
- Nejlepší výsledky poskytly semiměřické kamery středního formátu. Nejhorší výsledky pak neměřické kamery malého formátu. Neměřické kamery středního formátu poskytnou stejně dobré výsledky jako semiměřické kamery malého formátu.

V projektu CIPA jsem se zúčastnil čtyřmi variantami řešení. Použil jsem snímky ze semiměřické kamery Rollei 6006 a neměřické kamery Hasselblad 500EL/M, obě kamery jsou středního formátu. Pro každou kameru jsem provedl vyrovnání pro maximum (46) a minimum (3) vřícovacích bodů. Jednotlivé experimenty byly označeny Has a Hasmin u kamery Hasselblad a Rol, Rolmin u kamery Rollei. Označení *min* znamená minimum použitých vřícovacích bodů, kdy dva jsou na přední a jeden na zadní stěně fasády. Ve všech těchto čtyřech experimentech bylo použito dvou doplňkových parametrů (koef. a_3 a a_4) pro eliminaci radiálního zkreslení. Vyhodnoceny byly všechny zadané body,

v tab. 4.1 jsou uvedeny dosažené střední jednotkové chyby σ_0 , počet měření m , počet neznámých n , a počet snímků s .

Tab. 4.1: Přehled variant

| varianta | σ_0 | n | m | s |
|-----------|--------------|-----|------|-----|
| Has | 11,3 μm | 491 | 822 | 13 |
| Rol | 11,2 μm | 518 | 1098 | 14 |
| Hasmin | 13,0 μm | 434 | 687 | 13 |
| Rolmin | 11,5 μm | 503 | 965 | 14 |
| Rol-V-bez | 8,8 μm | 273 | 725 | 14 |
| Rol-V | 6,9 μm | 275 | 740 | 14 |
| Has-V | 7,8 μm | 257 | 570 | 13 |
| Leica-V | 7,3 μm | 269 | 394 | 12 |

Rozdíl mezi středními jednotkovými chybami σ_0 není výrazný, o rozdílech mezi variantami však dobře vypovídají elipsy chyb viz např. obr. 4.3, kde ve variantě *min* elipsy se zvětšují od vřícovacích bodů ke kraji fasády, kdežto při maximálním počtu vřícovacích bodů jsou elipsy chyb na celé fasádě prakticky stejně velké. Body určené ve variantách *min* mají výrazně větší poloosy chybových elips. Stejně je tomu tak při porovnání kamer. Profesionální semiměřická kamera Rollei poskytuje přesnější výsledky, než kamera Hasselblad. Dosažené výsledky v mých experimentech potvrzují celkové závěry. Mimo projekt CIPA jsem provedl vyrovnání jen s měřeními na velmi dobře identifikovatelných bodech. Mimo výše uvedených kamer jsem ještě zpracoval snímky malého formátu semiměřické kamery Leica Elcovision. V tab. 4.2 jsou tyto varianty označeny písmenem V, přípona *bez* znamená bez použití doplňkových parametrů. Zlepšení střední jednotkové chyby σ_0 , je významné ve všech čtyřech V-variantách.

5. PROGRAMOVÝ SYSTÉM DMU

V policejní činnosti je jedním z podkladů, při posuzování události spojené se spácháním trestného činu, kvalitní fotodokumentace a plán místa události. Plán místa události dává trochu méně informací než fotografie, ale poskytuje rozměrové vztahy, které nejsou na fotografii vždy zřejmé a nelze je přímo na fotografii určit. Vyvinutý programový systém DMU slouží dokumentaci místa události fotogrammetrickou metodou. Tento software je používán Kriminální ústavem v Praze od roku 1992, bylo jím vyhodnoceno každý rok několik desítek událostí. Na základě dobrých zkušeností byl tento systém pořízen v roce 1997 pro deset pracovišť, ve velkých městech ČR. Dále tento systém používá okresní ředitelství v Liberci pro dokumentaci vážných dopravních nehod. Systém DMU se skládá ze dvou základních částí. První část slouží k měření snímkových souřadnic a výpočtu prostorových souřadnic určených bodů. Druhá část, kterou tvoří zejména knihovny značek, slouží pro kreslení plánu. První část programu (fotogrammetrická část) jsem vytvořil ve spolupráci s Ing. Petrem Málkem, CSc. (dříve FE VUT v Brně, nyní Geodis Brno s. r. o) v jazyce Pascal v. 6.0. Vycházel jsem z programu ABF2 [12]. Pro snímkování jsou používány upravené maloformátové kamery, do kterých je vlepena mřížka 5×7 křížků s roztečí 5 mm. Po kalibraci můžeme tyto kamery nazvat semiměřickými. Snímkové souřadnice jsou měřeny pomocí digitizéru na zvětšeninách snímku většinou formátu 13×18 cm. Toto pětinašobné zvětšení zvyšuje přesnost měření digitizéru (0,12 mm) na potřebnou přesnost měření snímkových souřadnic t. j. cca 25 μm . Software byl vyvíjen s ohledem na dané požadavky, t. j. co nejjednodušší obsluha, což přinášelo problémy zejména ve stanovení výchozích přibližných hodnot prvků orientace a stanovení souřadnic vřícovacích bodů. Fotogrammetrická část programu má v základní nabídce 4 moduly: Referenční body (F1), Digitalizaci (F2), Zpracování (F3) a Kamera (F4). V modulu Referenční body je možné zadat prostorové souřadnice vřícovacích bodů, nebo mohou být vypočteny z měřených délek v trojúhelníku. Modul Digitalizace slouží ke vstupu měřených snímkových souřadnic z digitizéru. Nejprve se měří vřícovací body, pak body mřížky a dále body polohopisu. Pro spolehlivost transformace měřených snímkových souřadnic do souřadnicového systému mřížky byl vyvinut kontrolní algoritmus pro výběr křížků mřížky pro transformaci, neboť ne všechny body mřížky je možno identifikovat dobře a některé křížky na snímku je možné vynechat. V modulu Zpracování jsou dvě řešení orientace snímku. Jedno pro určení jen prvků vnější orientace (A6), druhé je doplněno určením prvků vnitřní orientace (B9), pokud je použit objektiv s neznámými parametry. Pak jsou vypočteny prostorové souřadnice všech určených bodů. V modulu Kamera jsou zadávány parametry kamer a objektivů. Kamera je určena velikostí mřížky a výrobním číslem. Objektivy jsou definovány výrobním číslem a prvky vnitřní orientace. Výsledkem je soubor se souřadnicemi bodů, který slouží k tvorbě plánu místa události v CAD.

6. ZÁVĚR

Habilitační práce shrnuje výsledky dosažené autorem v oblasti blízké fotogrammetrie v letech 1991–1998. Kapitoly 3., 5. a 6. mají výzkumný a vývojový charakter, 4. kap. stručně pojednává o přesnosti měření, 8. kap. o digitálních kamerách. V 7. kap. jsou uvedeny vybrané zajímavé aplikace řešené autorem. Poznatky uvedené v 3. kap. s výjimkou 3.2, dále v kap. 5., 6., 7. nebyly dosud autorem publikovány. Systém DMU je používán pět let v Kriminallistickém ústavu Policie ČR. Každým rokem je fotogrammetricky dokumentováno několik desítek závažných trestných činů. Vývoj systému přispěl k prosazení blízké fotogrammetrie v policejní praxi v ČR. V roce 1997 byl tento systém instalován na dalších deseti pracovištích pro potřeby kriminalistů ve vybraných oblastech. Pro dokumentaci závažných dopravních nehod je tento systém používán Policií ČR v Liberci. V Praze i v Liberci je používán pro tyto účely systém firmy Rollei. Účastí na projektu CIPA a zpracováním dalších snímků poskytnutých Ústavem fotogrammetrie a dálkového průzkumu TU Wien byly získány poznatky s kalibracemi kamer a použitím minima vřícovacích bodů. Je možné konstatovat, že prvky vnitřní orientace lze při kalibraci semiměřických kamer získat s přesností 0,02 – 0,05 mm, u neměřických kamer 0,05–0,10 mm, lepší výsledky jsou u širokouhlých objektivů. Matematický model pro odstranění zkreslení objektivu je ve většině případů vhodné volit jednoduchý, počet doplňkových parametrů je 2–4 koeficienty. Při použití minima vřícovacích bodů je možné dosáhnout vyhovujících výsledků v případě dobré konfigurace a homogenního bloku snímků. V opačném případě dochází k numerickým potížím, zejména při použití doplňkových parametrů. V extrémních případech, kdy úloha je obecně chudá na informace je nutné opatrně volit počáteční hodnoty parametrů, popřípadě využít fiktivních měření. Úpravou neměřické kamery Pentacon Six vestavěním mřížky navrženou autorem získal ústav geodézie na FAST VUT v Brně semiměřickou kameru používanou ve výuce fotogrammetrie a pro speciální práce.

7. LITERATURA

- [1] ALMAGRO A., PATIAS P., WALDHÄUSL P.: The CIPA "O.Wagner Pavilion TEST", In: : IA PRS, Vol. XXXI, Part B5 , p. 463–470, Vienna 1996.
- [2] ABDEL AZIZ J.: Accuracy Aspects of Non-Metric Imageries, Photogrammetric Engineering, N.9/1974, p. 1107–1117.
- [3] BACHMANN V., HLAVÁČEK J., BENDL P., TICHÝ J.: Dokumentace místa události s využitím metody blízké fotogrammetrie, Odborná sdělení Kriminálního ústavu 3–4/1993, str.1–13.
- [4] BOPP M., KRAUSS H.: Extension of the 11-parameters solution for the on-the-job calibration of non-metric cameras. In: Symposium of Photogrammetry for Industry, Stockholm 1978.
- [5] BROWN D. C.: Calibration of Close-Range Cameras. In: IA PRS, Vol. XIX, Com. V., Ottawa 1972.
- [6] FAIG W.: Calibration of Close – Range Photogrammetry Systems. In: IA PRS, Vol. XXI, Part 4, p. 1479–1486, Helsinki 1976.
- [7] FAIG W., HABROUK H. EL., LI X. P.: Determination of geometric characteristics of a digital camera by self calibration, In: IA PRS, Vol. XXXI, Part B1, p. 60–64, Vienna 1996.
- [8] FRASER C. S.: Multiple Focal Self Calibration of Close Range Metric Cameras, Photogrammetric Engineering, N. 9/1980, p. 1161–1171.
- [9] FRASER C. S.: Multiple exposures in non-metric camera applications. In: IA PRS, Vol. XXV, Part A5, p. 286–295, Rio de Janeiro 1984 .
- [10] FRASER C. S.: Network design optimization in non-topographic photogrammetry. In.: IA PRS, Vol. XXV, Part A5, p. 296–308, Rio de Janeiro 1984 .
- [11] HAAN A., MUSIO L.: Mathematical aspects of digital photogrammetry, In: Modern trend in photogrammetry, Giovanna Togliatti Memorial Tutorial, Washington D. C. 1992, Milano 1994, p. 19–33.
- [12] HANZL V.: Metody analytické fotogrammetrie, disertační práce, Brno 1985, 70 str.
- [13] HANZL V.: Neměřické kamery v blízké fotogrammetrii. In: Nové poznatky v geodézii z pohledu mladých absolventů oboru geodézie a kartografie, ČSVTS, Brno 1986, str. 82–84.
- [14] HANZL V.: Calibration of unprofessional semi-metric camera. Zeszyty naukowe AR ve Wroclawiu, NR 251, 1994, str. 263–265.
- [15] JACHIMSKI J., BOROŇ A.: The semimetric 6×6 reseau camera for the close range projects of high accuracy. In: IA PRS, Vol. XXIX, Part B5, p. 298–304, Washington 1992.
- [16] KAGER H., KRAUS K.: Gemeinsame Asgleichung photogrammetrischer, geodetischer und fiktiver Beobachtungen, In: IA ISP, Vol. XXI / 6, Helsinki 1976.
- [17] KONECNY G.: Paradigm changes in ISPRS from the first to the eighteenth Congress in Vienna, Keynote paper to the 18. ISPRS Congress, Highliths, 1996, Vol. 1, N. 1, p. 10–15.
- [18] KRAUS K.: Photogrammetry, Vol. 1, Dümmler Verlag Bonn, 1993, 397 stran.

- [19] MURAI S., MATSUOKA R., OKUDA T.: A study on analytical calibration for nonmetric camera and accuracy of three dimensional measurement. In: IA PRS, Vol. XXVII, Part B5, p. 570–579, Kyoto 1988.
- [20] MASON S. O.: Expert System-Based Design of Photogrammetric Networks, Mitteilungen Nr. 53, 1994, ETH Zürich, 187 p.
- [21] MURAI S., MATSUOKA R., OKUDA T.: A study on analytical calibration for non-metric camera and accuracy of three dimensional measurement. In: IA SPR, Vol. XXVII, Part B10, p. 570–579, Kyoto 1988.
- [22] MCINTOSH K.: A calibration procedure for CCD array cammeras. In: IA PRS, Vol. XXXI, Part B1, p. 138–143, Viena 1996.

8. ABSTRACT

In the habilitation thesis “Non-metric and semimetric cameras in close-range photogrammetry” are summarised results of research and development works achieved in the years 1991–1998. There are given experiences with calibration of non-metric and semimetric cameras. There were confirmed, that only few additional parameters are sufficient for elimination of distortion in most examples. Adopted camera Pentacon Six is used after calibration for exercises of photogrammetry now. The aim of CIPA test was twofold. First to check the current state-of-art in architectural photogrammetry. Second, to develop network of photogrammetric institutes, with proven expertise in architectural photogrammetry. The results of my solution showed the possibility to obtain very good accuracy with middle format cameras. Solution using minimum control points provided sufficiently accurate data (1–2 cm) for architectural purposes, if we keep given rules. The error ellipses show clearly the differences between solution with minimum and maximum control points. The program system DMU was developed for documentation of place, where the criminal act occurred. DMU has been used in Criminal Institute in Prague since 1993. Good experiences with using DMU led to establishment of 10 further workplaces. Rules for using of non-metric and semimetric cameras are summarised.