

3.3. Komory pro pozemní fotogrammetrii

Pro pořízení *měřického snímku* používáme **měřické komory – fototeodolity**. Na přesnost jejich konstrukce, kvalitu použitých materiálů a optiky jsou kladeny vysoké nároky. Prvky *vnitřní orientace* (PVO) mají známé a neměnné hodnoty, které jsou určeny výrobcem pro každý kus a uvedeny v kalibračním protokolu.

Pro nastavení nebo měření úhlových prvků *vnější orientace* jsou *fotografické komory* vybaveny *orientační soustavou* tvořenou dvěma trubicovými, tzv. křížovými libelami nebo samostatnými sázecími libelami (po jejich urovnání bude pootočení snímku $\kappa = 0$ a sklon osy záběru $\omega = 0$ nebo bude pomocí vložených, přesně vybroušených kovových klínů nastaven na jinou požadovanou hodnotu). Součástí orientační soustavy je dále orientační zařízení – vodorovný kruh s odečítací pomůckou a dalekohledem (pro nastavení orientačního úhlu φ). K další výbavě komory patří také stativy a trojpodstavcová souprava.

Fototeodolit = fotografická komora + orientační soustava

– **fotografická komora:**

objektiv (radiální distorze $\Delta r' \leq 10 \mu\text{m}$), tělo komory (pevné, tvarově stálé), značkový rám (v zadní části komory), kazeta na fotografický materiál u klasických (analogových) komor nebo snímač (senzor) se světlocitlivými čidly (např. matice prvků CCD)

Fotografické materiály mají mít vysokou rozlišovací schopnost (*100 až 150* μm , tj. rozlišitelných čar na jeden milimetr). U digitálních komor musejí být čidla umístěna ve sloupci a řádce matice s přesností *1-2* μm .

– **orientační soustava:**

křížové libely (na horní části komory) nebo sázecí libela a vybroušené klíny, orientační zařízení (vodorovný kruh s odečítací pomůckou a dalekohledem)

Na snímek se při expozici ze **značkového rámu** kromě obrazů **rámových značek** kopírují i **rámové údaje**: v plíšku vyražená hodnota konstanty komory, číslo snímku nebo číslo základny, označení levého (A) a pravého (B) snímku, vlevo (AL, BL) nebo vpravo (AR, BR) stočeného případu a případně další údaje, např. datum a místo pořízení snímku (ručně napsané na vložené matnici).

➤ Měřické komory dělíme:

- podle způsobu záznamu obrazu: klasické (analogové) a digitální komory
- podle počtu fotografických komor: jednotlivé a dvojité komory
- podle sklonitelnosti osy záběru: s vodorovnou a sklonitelnou osou záběru
- podle typu objektivu:
 - s malým obrazovým úhlem *45-50°* (tj. velkou konstantou komory), $f(13 \times 18) > 210 \text{ mm}$, $\Delta r' = 2-3 \mu\text{m}$

- s normálním obrazovým úhlem 60° ,
 $f(13 \times 18) = 150-210 \text{ mm}$,¹ $\Delta r' = 3-4 \mu\text{m}$, označení např. **Tessar**²
- širokoúhlé – obrazový úhel 90° ,
 $f(13 \times 18) = 110-150 \text{ mm}$, $\Delta r' = 2-6 \mu\text{m}$, označení např. **Lamegon**
- zvláště širokoúhlé – obrazový úhel 120° ,
 $f(13 \times 18) < 110 \text{ mm}$, $\Delta r' = \text{až } 10 \mu\text{m}$, označení např. **Super Lamegon**

Měřické komory dosahují relativní přesnosti v určení prostorové souřadnice y $0,5 \text{ ‰}$ až $0,05 \text{ ‰}$ (tj. $1:2000$ až $1:20\ 000$ neboli $1 \text{ mm} / 2$ až 20 m).

Použití měřických komor je vhodné pro práce vyšší přesnosti, na větší vzdálenosti (dosah 300 až 500 m) a především pro dvousnímkovou metodu.

Dále je možné ve fotogrammetrii používat **semiměřické** (např. *réseau*) a **neměřické komory** (tj. fotoaparáty) nebo **speciální komory**.

A/ Jednotlivé měřické komory

- s vodorovnou osou záběru

➤ **PhoTheo 19/1318** (Carl Zeiss Jena, DDR)

- dnes již historický kus,
- $f_k = 190 \text{ mm}$ (normální objektiv),
- snímky o rozměrech $13 \times 18 \text{ cm}$ na skleněných deskách (lze je těžko skenovat), do kazety je možné vložit i plochý (listový film), formát snímku pouze na šířku,
- objektiv posuvný ve vertikálním směru po 5 mm (náhrada sklonu osy záběru),
- pevná clona, nemá uzávěrku – expozice se provádí sejmutím víčka,
- minutové orientační zařízení umístěno nad komorou,
- využívá trojpodstavcové soustavy (balalať, Theo 030)

- se sklonitelnou osou záběru

➤ systém **UMK** – *Universal Messung Kammer* (Carl Zeiss Jena, DDR)

- rozšířený a velmi kvalitní systém univerzálních měřických komor
- výroba zahájena v roce 1969 a ukončena v 90. letech 20. století
- charakteristická je vysoká kvalita optiky
- čtyři typy fotografických komor podle úhlu záběru:

UMK 6,5/1318 – zvláště širokoúhlá,

UMK 10/1318 – širokoúhlá (základní typ řady),

UMK 20/1318 – s normálním obrazovým úhlem,

UMK 30/1318 – s malým obrazovým úhlem,

¹ Ohnisková vzdálenost, resp. konstanta komory normálního objektivu přibližně odpovídá úhlopříčce formátu snímku.

² Výrobci dodržují označování standardními názvy, kdy poslední písmena názvu vypovídají o obrazovém úhlu objektivu.

- objektiv není výměnný, vyměňuje se celá fotografická komora v závěsu,
- snímek může být pomocí dvou párů čepů orientován na šířku i na výšku,
- možnost expozice na skleněné desky, listový film v kazetách i na film v pásech,
- osa záběru je sklonitelná v krocích (po 15°) až k zenitu (např. pro snímkování kleneb v interiérech),
- zaostřování na výrobcem přednastavené hodnoty (změna f_k vyznačena v rámových údajích),
- měnitelná clona i expozice,
- součástí výbavy FM rámeček (pro nastavení osy záběru kolmo k objektu při použití v jednosnímkových metodách),
- závěs komory s orientačním zařízením pod komorou obsahuje minutový stroj s repetiční svorou,
- další tři typy závěsů: jednoduchý (nemá orientační zařízení), dvojitý (nosník pro dva jednoduché závěsy – vytváří normální případ stočení osy záběru) a vertikální (svislá osa záběru – pseudoletectká fotogrammetrie)

B/ Digitální měřické komory

Objevuje se problém výroby velkých, přesně do řádek a sloupců uspořádaných matic čidel (např. senzorů s prvky CCD), tak aby byla splněna podmínka geometrické přesnosti v měřítku snímku $1-2 \mu m$. V pozemní fotogrammetrii je řešen dvěma způsoby: postupným snímáním obrazu (tj. skenováním) nebo použitím čipů, které nemají maximální možné rozměry, ale jsou dostatečně velké a splňují podmínku přesnosti.

- *postupné snímání obrazu (skenování)*

➤ *UMK – HighScan*

- vznikla úpravou klasické měřické komory *UMK*,
- formát snímku $13 \times 18 \text{ cm}$ ($11.000 \times 15.000 \text{ pix}$, tj. 165 Mp) je skenován čtyřmi maticemi CCD prvků ($748 \times 512 \text{ pix}$) s velmi přesným posunem – tzv. *macro-scanning*,
- snímání trvá cca 6 minut a vznikne tak 200 MB dat,
- relativní přesnost v prostorové souřadnici se uvádí $0,05\%$, (tj. $1 \text{ mm} / 20 \text{ m}$)

➤ *Rollei RSC (Réseau Scanning Camera)*

- snímek $50 \times 50 \text{ mm}$ ($4500 \times 4500 \text{ pix}$, tj. 20 Mp) je skenován jednou maticí CCD ($768 \times 581 \text{ pix}$),
- v obraze síť křížků po 1 mm ,
- využití v průmyslu na kratší vzdálenosti (sledování obrábění, tvarová kontrola výrobků, kalibrace robotů, určování deformací, atd.)

➤ *JenScan 4500MC*

- využívá tzv. *micro-scanning* – mikroposun matice (menší než velikost jednoho prvku CCD) pro zvýšení rozlišení snímku

- **velké CCD čipy (senzory)**³

➤ **ICAM 28 a ICAM 6 (Philips)**

- jeden CCD senzor: $86 \times 50 \text{ mm}$, tj. $7168 \times 4096 \text{ pix}$ (29 Mp) nebo menší varianta $3072 \times 2048 \text{ pix}$ (6 Mp), čidla jsou uspořádána do matice s přesností $1 \mu\text{m}$

➤ **Q16 MetricCamera (Rolleimetric)**

- čtvercový CCD senzor $4096 \times 4096 \text{ pix}$ (tj. $16,8 \text{ Mp}$) pokrývá celé obrazové pole svitkového filmu $6 \times 6 \text{ cm}$ (úprava *Rolleiflex 6006*)

C/ Dvojité komory

Používaly se pro blízkou a velmi blízkou stereofotogrammetrii. Dnes jsou ve svých původních oblastech využití nahrazeny semiměřickými komorami a průřezovou fotogrammetrií.⁴ Dělí se do dvou skupin podle dosažitelné přesnosti:

- **I. řádu (přesnější)**

➤ **IMK 10/1318**

- nepřenosná, určená pro využití v průmyslu – ve výrobních halách (velmi blízká fotogrammetrie),
- plynule měnitelná délka základny ($35\text{-}160 \text{ cm}$)

➤ **dvojitý závěs UMK 10/1318**

- nosník pro připevnění dvou jednoduchých závěsů ve třech různých délkách základny ($b = 84, 58$ nebo 32 cm),
- získáme normální případ se sklonitelnými osami záběru

- **II. řádu (méně přesné)**

➤ **SMK 5,5/0808**

- dvě komory na pevné základně (120 nebo 40 cm), normální případ,
- $f_k = 56 \text{ mm}$, širokoúhlý objektiv velkého průměru s pevným zaostřením (8 nebo 4 m),
- desky $9 \times 12 \text{ cm}$ se čtvercovým rozměrem vlastního snímku $8 \times 8 \text{ cm}$ (ve zbylé části rámové údaje),
- ovládání z centrálního panelu (clona, expozice, číslo snímku, atd.),
- napájení z externího zdroje (také pro osvětlení rámových údajů a značek),
- sklonitelná osa záběru v krocích (po 15°) až do zenitu i nadiru,
- speciální masivní stativ s výsuvnou tyčí,

³ V profesionální (ateliérové) fotografii se používají fotoaparáty se senzory většími, než jaké jsou používané ve fotogrammetrii. Nesplňují ale podmínku geometrické přesnosti $1\text{-}2 \mu\text{m}$ uspořádání čidel v matici do řádek a sloupců. Jsou to například výrobky firmy *Leica S2* (senzor $45 \times 30 \text{ mm}$, $7500 \times 5000 \text{ pix}$, tj. 37 Mp) nebo *Hasselblad H5D-60* (senzor $53,7 \times 40,2 \text{ mm}$, $8956 \times 6708 \text{ pix}$, tj. 60 Mp).

⁴ Metoda je odlišná, ale stejné jsou oblasti využití: dokumentace menších stavebních objektů na kratší vzdálenosti, dokumentace rozsáhlejších dopravních nehod nebo využití v průmyslu.

- využití pro dokumentaci památkových objektů (především vnitřní prostory) a větších dopravních nehod

➤ Další výrobci: *Wild, Opton Oberkochen NSR* (opět sloučen s firmou *Zeiss*)

D/ Semiměřické komory

Kvalitní fotoaparáty (nejčastěji digitální zrcadlovky), které již výrobce uzpůsobil pro využití ve fotogrammetrii (fixovaná ohnisková vzdálenost – tj. konstanta komory), určil prvky vnitřní orientace a uvádí je v kalibračním protokolu. Objektivy nejsou speciálně konstruovány, takže radiální distorze dosahuje na okrajích snímku až $200 \mu\text{m}$. Nemají orientační soustavu. Digitální semiměřické komory nesplňují podmínku geometrického uspořádání čidel v senzoru $1\text{--}2 \mu\text{m}$. Používají se pouze na kratší vzdálenosti (do 30 m), v oblasti tzv. blízké fotogrammetrie, pro průřezovou a jednosnímkovou fotogrammetrii (dokumentace menších stavebních objektů, rozsáhlejších dopravních nehod nebo ve strojírenství).

➤ ***Rolleiflex d7,d30 a d507 metric (RolleiMetric)***⁵

- digitální komora se snímačem o velikosti pouze $2552 \times 1920 \text{ pix}$ (tj. $4,8 \text{ Mp}$)
- kalibrace komory provedená výrobcem (známé prvky vnitřní orientace)

➤ ***Rolleiflex 6008 AF digital metric (RolleiMetric)***

- komora s digitální stěnou *PhaseOne* ($16, 22$ až 39 Mp)
- kalibrace komory provedená výrobcem
- výměnné objektivy

➤ ***ALPHA 12 METRIC***

- pevně montovaná digitální stěna (*Phase One, Leaf* nebo *Hasselblad*)
- fixovaná ohnisková vzdálenost ($f = 8 \text{ mm}$)
- stavebnicový systém (objektiv, tělo komory, digitální stěna, příslušenství)
- využití v průmyslu a pro mapovací práce

➤ ***V-STARS (Geodetic Systems)***

- použit fotoaparát *Nikon D800*, senzor $7360 \times 4912 \text{ pix}$ (snímek 12 až 36 Mp)
- fixovaná ohnisková vzdálenost
- snímky mohou být přenášeny do počítače pomocí bezdrátového přenosu (*Wi-Fi*) okamžitě po jejich pořízení
- systém obsahuje notebook a software pro automatické zpracování snímků
- využití především v průmyslu

⁵ V roce 2008 koupila stoprocentní podíl ve firmě *RolleiMetric* společnost *Trimble*.

- Réseau komory⁶

Patří mezi *semiměřické komory* – jsou to výrobcem upravené a kalibrované profesionální zrcadlovky. Před rovinou snímku je umístěna planparalelní destička se sítí křížků o známých souřadnicích (rovněž v kalibračním protokolu). Při expozici se obrazy křížků přenáší na každý snímek a umožňují pomocí transformace snímku digitalizovaného skenováním odstranit vliv srážky. Používají se především pro jednosnímkovou a průsekovou fotogrammetrii: dokumentace památkových stavebních objektů a dopravních nehod (v těchto oblastech využití nahradily dvojité komory).

➤ *Rolleiflex 6006, 6008 metric (RolleiMetric)*

- komory s výměnnými objektivy,
- snímky se pořizují na svitkový film (jedno políčko 6×6 cm),
- v ploše snímku síť $11 \times 11 = 121$ křížků (po 5 mm) pro typ *6006*, resp. $23 \times 31 = 713$ křížků pro typ *6008*,
- komora má také svojí digitální variantu

➤ *Rolleiflex 3003 metric (RolleiMetric)*

- snímky se pořizují na kinofilm (jedno políčko 24×36 mm),
- v ploše snímku síť $5 \times 7 = 35$ křížků (po 5 mm),
- používá se pro práce menší přesnosti

➤ Další výrobci: *Leica, Nikon, Pentax, Phidias*

E/ Neměřické komory (fotoaparáty)

Fotoaparáty, u kterých výrobce nepředpokládá použití ve fotogrammetrii. Zkreslení objektivu (radiální distorze) dosahuje na okrajích snímku i více než 1 mm. Kalibraci komory (tj. určení neznámých prvků vnitřní orientace) lze pro zvolené ohniskové vzdálenosti provést pomocí kalibračního pole a specializovaného software. Senzory digitálních fotoaparátů nesplňují podmínku geometrické přesnosti uspořádání čidel $1-2$ μ m. Analogové snímky je možné pořizovat na svitkový film (6×6 cm) nebo kinofilm (24×36 mm). Nejvhodnější je použít jednooké zrcadlovky s kvalitními výměnnými objektivy, ale pouze na kratší vzdálenosti (do cca 15 m) a pro práce nižší přesnosti – především pro jednosnímkovou a průsekovou metodu.

U kalibrovaných komor se známým průběhem radiální distorze lze opravit polohu pixelů digitálního obrazu a vytvořit tak idealizovaný snímek téměř bez zkreslení nebo vliv zkreslení objektivu na okraji snímku omezujeme tak, že pro měření využíváme pouze oblast kolem jeho středu (cca 60% plochy). Systém snímkových souřadnic je definován rohy snímku. Pokud není fotoaparát kalibrován, je možné zjistit hodnoty prvků vnitřní orientace dodatečně při vyhodnocení snímků výpočtem z dostatečného množství vlíčovacích bodů pomocí DLT – direktní lineární transformace (min. 6 VB).

⁶ Slovo *réseau* [rezo] je z francouzštiny a znamená *mřížka*.

Pro formát políčka kinofilmu $24 \times 36 \text{ mm}$ lze dosáhnout u digitálních snímků srovnatelných výsledků se snímky analogovými – porovnáme jejich rozlišení:

Při rozlišení $50' / \text{mm}$ (tj. citlivá vrstva s nižším rozlišením) a velikosti jednoho prvku CCD $10 \mu\text{m}$ to znamená $3600 \times 2400 \text{ pix} = 8 \text{ Mp}$ (na vyjádření jedné rozlišitelné čáry potřebujeme alespoň dva pixely). Při rozlišení $100' / \text{mm}$ (průměrná rozlišovací schopnost citlivých vrstev) je to již ale $7200 \times 4800 \text{ pix} = 34 \text{ Mp}$. Takového rozlišení již dosahují pouze kvalitní profesionální fotoaparáty (zrcadlovky) středního formátu s tzv. *digitální stěnou*.

F/ Speciální komory

➤ balistické komory

- slouží pro určování dráhy letu družic a raket nebo letadel a střel při startu,
- vysoce kvalitní optika, světelné objektivy s dlouhým ohniskem,
- expozice je velice krátká a nutné je přesné určení času expozice (okamžiku pořízení každého z řady snímků),
- používá se automaticky řízený, plynulý, prostorový pohyb komory na mechanickém rameni sledující snímané těleso

➤ kinofototeodolity

- kombinace fototeodolitu (měřické komory) a kamery pro sledování rychlých dějů, např. deformace nosníků a jiných konstrukcí při zátěžových zkouškách (tzv. crash-testy automobilů),
- komora pořizuje 30 až více než 1.000.000 snímků za vteřinu

➤ videoteodolity

- totální stanice se zabudovanými digitálními kamerami, lze pořizovat jednotlivé snímky nebo videozáznam
- doplněn může být laserový scanner a přijímač GNSS,
- pro každý snímek obrazového záznamu jsou uloženy přesně měřené prvky vnější orientace (odpadá potřeba vlčovicových bodů)

➤ panoramatické komory a videokomory

- *panoramatické komory* s rotujícím objektivem: analogové (záznam obrazu na film přimknutý k zakřivené ploše) a digitální s čidly v jednom sloupci, nebo konstruované na principu vícenásobné komory, úhel záběru může být až 360° ⁷
- *videokomory* pořizují kontinuální záznam obrazu, vzniká velké množství dat (na 1 minutu záznamu senzorem CCD $800 \times 600 \text{ pix}$ cca 1GB dat)
- *panoramatické komory* i *videokomory* se využívají pro ***mobilní mapování*** (např. zaměření liniových staveb podél dráhy pohyblivého nosiče – automobilu), nutné je průběžné měření a záznam prvků vnější orientace, proto se systém doplňuje přijímačem GNSS (pro určování lineárních prvků vnější orientace), inerciální jednotkou (pro určování úhlových prvků vnější orientace) a odometrem (pro měření ujeté dráhy), součástí bývá také laserový scanner.

⁷ Objektivy typu „rybí oko“ s úhlem záběru 180° nejsou pro použití ve fotogrammetrii vhodné – mají obrovská zkreslení.