

3. Pozemní fotogrammetrie

3.1. Charakteristika pozemní fotogrammetrie – metody a využití

Nepohyblivé stanovisko leží na zemi, osa záběru je většinou vodorovná (nebo přibližně ve vodorovném směru), předměty měření mají velké převýšení na malé ploše (např. průčelí budov, skalní stěna). Zachycujeme okamžitý stav s minimální dobou zaměření v terénu. Úspora času se projeví především u objektů s velkým počtem podrobných bodů a nepravidelnými tvary. Lze použít i pro obtížně přístupné nebo zdraví škodlivé prostory.

➤ Dělení metod:

- podle počtu snímků: jednosnímková, dvousnímková a průseková
- podle vyhodnocení:
 - a) grafické
 - b) analogové vyhodnocení – mechanické nebo početní řešení (tj. semianalytické)
 - c) analytické vyhodnocení – početní řešení nebo na analytickém stroji a obecné početní řešení (pro obecně orientované snímky)
 - d) digitální (zpracování digitálních snímků na počítači)
- podle směru os záběru rozlišujeme:
 - a) pro orientační úhel φ : *normální případ* ($\varphi = 0$), *vlevostočený* ($\varphi > 0$) a *vpravostočený případ* ($\varphi < 0$); ostatní úhly bývají nulové [$\kappa = 0$, $\omega = 0$]
 - b) pro sklon osy záběru ω : *vodorovnou osu* ($\omega = 0$) a *skloněnou osu* ($\omega \neq 0$); ostatní úhly bývají nulové [$\kappa = 0$, $\varphi = 0$]
 - c) pro všechny úhly: *obecně orientovaný případ* ($\kappa \neq 0$; $\varphi \neq 0$; $\omega \neq 0$)
 - d) pro vzájemnou polohu os záběru: *rovnoběžné osy*, *konvergentní osy* (mírně se sbíhají) a *divergentní osy* (mírně se rozbíhají)

Vyhodnocení	normální případ	stočený případ	skloněné osy	obecný případ	konvergentní osy	divergentní osy
grafické	ano	ano	ne	ne	omezeně	omezeně
analogové	ano	ano	vybrané úhly	ne	malé hodnoty	malé hodnoty
analytické	ano	ano	ano	omezeně	omezeně	omezeně
obecné početní	ano	ano	ano	ano	vhodné	nevhodné
digitální	ano	ano	ano	ano	dle metody ¹	nevhodné ²

➤ Využití:

- doplňková metoda podrobného fot. mapování (strmé svahy, skalní stěny)
- zaměřování strmých údolních stěn (pro vodohospodářské a dopravní stavby)
- zaměřování lomů a povrchových dolů (určování kubatur vytěženého materiálu)
- skládky sypkých hmot (např. inventarizace zásob uhlí v elektrárnách)
- určování profilů výkopů a násypů, koryt vodních toků, apod.
- dokumentace stavebních objektů (především památkově chráněných)
- speciální využití: světelné řezy, zákres objektu do snímku a metoda časové základny

¹ Pokud má být použito stereoskopické vyhodnocení, musí být zachována rovnoběžnost os záběru.

² Vlivem rozbíhajících se os záběru se zmenšuje společná (překrytová) část snímků.

3.2. Postup prací v pozemní fotogrammetrii¹

1. Přípravné práce

a) vyhledání dostupných podkladů (starší mapy a plány, fotografie, jiná dokumentace) a geodetických údajů o bodovém poli

b) volba metody – uvažujeme:

- přesnost metody
- časovou náročnost
- počet a kvalifikaci pracovníků
- přístrojové vybavení (komora, vyhodnocovací stroje a systémy, výstupní zařízení – např. tiskárny)
- ekonomické hledisko (materiál, osoby, náklady na provoz, zisk)
- bezpečnost práce (práce na stavbách, v lomech, ve výškách, apod.)

Jednosnímková fot. – umožňuje jednoduché a rychlé určení polohy v rovině. Prostorové členění způsobuje chyby v poloze bodů. Výsledkem vyhodnocení je fotoplán, nad kterým lze následně provést vektorizaci.

→ Vhodná pro vyhodnocení rovinných průčelí budov nebo jejich částí.

Průseková fot. – umožňuje určení polohy bodů v prostoru bez použití umělého stereoskopického vjemu. Lze dosáhnout vysoké přesnosti určení uměle signalizovaných bodů na krátké vzdálenosti. Identifikac nesignalizovaných bodů na více snímcích může být obtížná. Veškerá kresba musí být rozložena na jednotlivé body. Výsledkem vyhodnocení jsou prostorové souřadnice bodů, vektorová kresba (tzv. drátový model) nebo model objektu včetně povrchů.

→ Vhodná pro vyhodnocení menších prostorově členěných stavebních objektů s dostatkem přirozeně signalizovaných bodů.²

Dvousnímková fot. – umožňuje určení polohy v prostoru s využitím umělého stereoskopického vjemu s vysokou přesností i na větší vzdálenosti (náročná na použité technologie a vybavení, dosah 300-500 m).

Stereoskopický vjem usnadňuje identifikaci bodů na snímcích a umožňuje vyhodnocovat i prostorové křivky.

Výsledkem vyhodnocení jsou prostorové souřadnice jednotlivých bodů nebo vektorová kresba.

→ Vhodná pro vyhodnocení prostorově členěných objektů s nepravidelnými tvary nebo pro mapování nepřístupného terénu.

¹ Uvedený postup platí především s ohledem na využití dvousnímkové pozemní fotogrammetrie. Při použití ostatních metod (jednosnímkové nebo průsekové) není třeba přesně určovat prvky vnější orientace (polohu komory na stanovisku, orientaci os záběru a stočení snímku).

² Při použití velmi blízké fotogrammetrie (cca do 3 m) lze pro uměle signalizované body dosáhnout submilimetrové přesnosti.

	<i>Jednosnímková fot.</i>	<i>Průseková fot.</i>	<i>Dvousnímková fot.</i>
<i>Lze použít jednoduché vybavení</i>	✓	✓	✗
<i>Potřeba zaměření vřícovacích bodů</i>	✗	✗	✓
<i>Určení polohy bodů v prostoru</i>	✗	✓	✓
<i>Využití umělého stereoskopického vjemu</i>	✗	✗	✓
<i>Potřeba použít měřickou komoru</i>	✗	✗	✓
<i>Práce vyšší přesnosti a na velké vzdálenosti</i>	✗	✗	✓

c) volba vhodného typu měřické komory

Podle zvolené metody, požadované přesnosti a vzdálenosti objektů volíme komoru **měřickou** (známé prvky vnitřní orientace, možnost měřit nebo nastavit prvky vnější orientace, vysoká vnitřní přesnost snímků), **semiměřickou** (fotoaparáty upravené a kalibrované výrobcem pro použití ve fotogrammetrii) nebo **neměřickou** (kvalitní fotoaparáty, např. digitální zrcadlovky).

Velikost konstanty komory (resp. ohniskové vzdálenosti) volíme opět podle požadované přesnosti a vzdálenosti objektů: pro práce vyšší přesnosti a na větší vzdálenosti **delší konstanta komory** (tzn. menší obrazový úhel), pro větší objekty a krátké vzdálenosti (např. při omezeném prostoru před objektem) **menší konstanta komory** (tzn. větší obrazový úhel).

Dále zvolíme **formát a orientaci snímku**, resp. rozměr a rozlišení snímku v hodnotách pixelů. **Rozlišení snímku**, tj. velikost jednoho pixelu digitálního obrazu ve skutečné velikosti na snímaném objektu lze vypočítat ze vzorce

$$r = m_s \cdot r' = s / f \cdot r',$$

kde m_s – měřítkové číslo snímku, s – vzdálenost objektu od místa snímkování, f – ohnisková vzdálenost objektivu (resp. konstanta komory), r' – velikost jednoho čidla na snímači.

Protože poslední veličinu často neznáme, lze rozlišení jednoduše odhadnout tak, že rozměr celé scény snímku ve skutečnosti (tj. šířku záběru), vydělíme počtem pixelů digitálního snímku v jedné řádce (tj. šířkou snímku v pixelech).

	<i>Měřická komora</i>	<i>Semiměřická komora</i>	<i>Neměřická komora (fotoaparát)</i>
<i>Známé prvky vnitřní orientace</i>	✓	✓	✗
<i>Potřeba odstraňovat vliv zkreslení objektivu</i>	✗	✓	✓
<i>Nastavení nebo měření orientačních úhlů</i>	✓	✗	✗
<i>Práce vyšší přesnosti na velké vzdálenosti</i>	✓	✗	✗

Shrnutí:

Na zvolené metodě závisí počet snímků pořízených v terénu a na typu použité komory možnost přesné orientace os záběru (nastavení úhlových prvků vnější orientace):

<i>Metoda</i>	<i>vhodná komora</i>	<i>nejčastější použití</i>
<i>Jednosnímková</i>	měřická, semiměřická i neměřická; při omezeném prostoru před objektem širokoúhlé objektivy	málo členitá průčelí stavebních objektů
<i>Dvousnímková</i>	klasické měřické komory (potřeba orientace os záběru); objektivy s normálním nebo malým úhlem záběru (pro vzdálenější objekty)	prostorově členěné objekty; přesné mapovací práce především na větší vzdálenosti;
<i>Průseková</i>	semiměřické (např. réseau) nebo neměřické komory	menší prostorově členěné stavební objekty s dostatkem přirozeně signalizovaných bodů (jen bodové vyhodnocení) a pouze na kratší vzdálenosti
<i>Digitální</i>	všechny typy – podle požadované přesnosti a vzdálenosti objektů	mapovací práce, dokumentace památkových, stavebních a jiných objektů, využití v průmyslu

2. Práce v poli (v terénu)

a) rekognoskace území nebo objektu

- volba stanovisek fotografování nebo fotogrammetrických základů a orientace os záběru – vhodné je volit tyto možnosti:

základnu rovnoběžnou s objektem – zajištění stejných měřítek obou snímků;

normální případ ($\varphi = 0$) – po odstranění vertikální paralaxy bude její hodnota nulová v celé ploše snímku (při přesunu měřické značky nezaniká po celou dobu vyhodnocení stereoskopický vjem)

vodorovné osy záběru ($\omega = 0$) – vzniká perspektivou nezkrácený obraz (tzn. neprojeví se sbíhavost rovnoběžek ležících v rovině kolmé na osu záběru); je tak umožněno snadné vedení měřické značky při vyhodnocení (pokud je třeba, je vhodné využít zvýšená stanoviště)

nepotočené snímky ve vlastní rovině ($\kappa = 0$) – protože odpovídající si spojnice rámových značek jsou na obou snímcích vzájemně rovnoběžné, relativní (tj. vzájemná) orientace snímků před vyhodnocením je snadná; současně se nezmenšuje velikost překrytové části snímků

Pro určení vhodné délky základny b vycházíme z tohoto vztahu:

$$b_{\min} = y_{\max} \cdot \frac{10}{f \text{ [mm]}} < b < y_{\min} \cdot \frac{40 \text{ až } 50}{f \text{ [mm]}} = b_{\max},$$

kde: b_{\min} a b_{\max} ...nejkratší a nejdelší možná délka základny

y_{\max} a y_{\min} ...největší a nejmenší vzdálenost předmětů měření před komorou
 f ...konstanta komory

Hodnota **10** ve vztahu pro nejkratší možnou základnu b_{\min} vychází z předpokládané střední chyby určení prostorové souřadnice m_y .³ Současně se zmenšující se základnou klesá přesnost vyhodnocení především pro vzdálené předměty (tj. pro y_{\max}).

Hodnoty **40 až 50 mm** = p_{\max} ve vztahu pro nejdelší možnou základnu b_{\max} jsou maximální horizontální paralaxy, při kterých je lidské oko ještě schopné ze dvou

³ Střední chyba určení prostorové souřadnice $m_y = \frac{y^2}{b} \cdot \frac{m_p}{f}$, kde m_p je předpokládaná střední chyba měření horizontální paralaxy.

Odtud: $b_{(\min)} = y_{(\max)} \cdot \frac{y}{m_y} \cdot \frac{m_p}{f}$, kde $\frac{y}{m_y}$ je převrácená hodnota předpokládané relativní přesnosti

$\frac{m_y}{y} = \frac{1}{1000}$ (zvětšení vzdálenosti předmětu o 1 m znamená pokles přesnosti souřadnice y o 1 mm).

Dále předpokládáme $m_p = 0,01 \text{ mm}$, potom: $b_{\min} = y_{\max} \cdot \frac{1000}{1} \cdot \frac{0,01}{f \text{ [mm]}} = y_{\max} \cdot \frac{10}{f \text{ [mm]}}$.

obrazů vytvořit umělý stereoskopický vjem. Se zvětšující se základnou velikost paralax roste a současně pro blízké předměty (tj. pro y_{min}) hrozí zobrazení mimo oblast překrytu snímků.

Pokud do nerovnic dosadíme hodnotu konstanty komory f , je možné vyjádřit tzv. **základnový poměr** $b/y_{stř}$, který udává závislost vhodné délky základny na střední vzdálenosti předmětu měření před komorou $y_{stř}$.

Např. pro komoru s konstantou $f = 200 \text{ mm}$ platí:

$$b_{min} = y_{max} \cdot \frac{1}{20} < b < y_{min} \cdot \frac{1}{4} = b_{max}, \text{ takže základnový poměr bude v rozmezí:}$$

$$\frac{1}{20} < \frac{b}{y_{stř}} < \frac{1}{4} \quad \text{nebo} \quad \frac{b}{y_{stř}} = \frac{1}{20} \text{ až } \frac{1}{4}$$

Pomocí základnového poměru lze snadno zjistit vhodnou délku základny takto:

$$\frac{1}{20} \cdot y_{stř} < b < \frac{1}{4} \cdot y_{stř} \quad \text{nebo} \quad b = \frac{1}{20} \cdot y_{stř} \text{ až } \frac{1}{4} \cdot y_{stř}$$

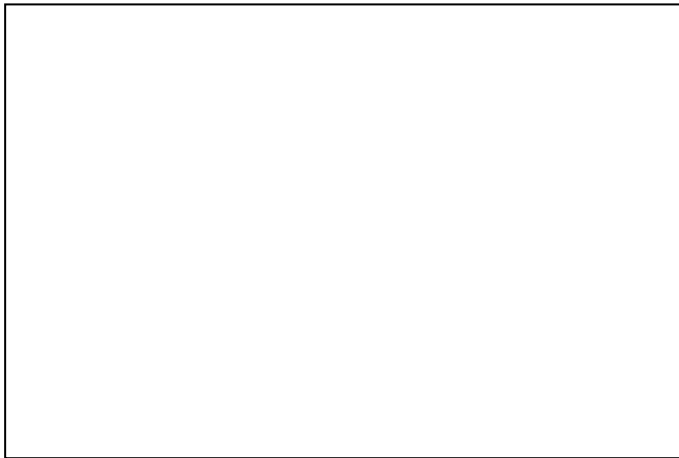
- maximální vzdálenost snímaného předmětu je cca 500 m
- převýšení mezi oběma stanovisky nemá přesáhnout hodnotu:

$$\Delta h_{AB} = 1/4 \text{ až } 1/5 \cdot b,$$

aby nevznikaly příliš velké vertikální paralaxy, které bude nutné před vyhodnocením odstranit

- provede se dočasná stabilizace pro geodetické zaměření stanovisek základny
- volba směru os záběru – normálního, vlevostočeného nebo vpravostočeného případu (s využitím hledáčku komory) a volba natočení formátu snímku na šířku nebo na výšku (dříve byl využíván také posun objektivu komory)
- fotogrammetrické základny mohou být samostatné, mohou na sebe navazovat (mají jeden společný bod) nebo je použita jedna základna pro případ normální, vlevo i vpravo stočený (běžný úhel stočení je 35° nebo volíme libovolnou hodnotu až do 50°)
- překrytové části sousedících základen na sebe musí navazovat pro zachování návaznosti vyhodnocení (viz obrázky)
- určení množství potřebného fotografického materiálu (tj. počtu snímků)
- volba způsobu geodetického zaměření vlíčovavých bodů

- vyhotovení situačního náčrtu (rozmístění stanovisek a základen, směry os záběru, schematický zákres zaměřovaného objektu nebo terénu a následně též umístění vlíčovacích bodů – pro přirozeně signalizované vlíčovací body je vhodné vyhotovit i detaily se zákresem nejbližšího okolí)



b) volba a signalizace vlíčovacích bodů

- vždy volíme podle zvolené metody nadbytečný počet přirozeně nebo uměle signalizovaných vlíčovacích bodů vhodné velikosti
- musí dobře ohraničovat a pokrývat celý zaměřovaný prostor
- musí ležet v překrytovém území na objektu nebo terénu (pro případ jednosnímkové fotogrammetrie v rovině překreslení)

c) snímkování

- postavení stativů na bodech základny, centrace, horizontace fotokomory a záměrného terče v třínožkách
- změření výšky objektivu komory a terče nad stanoviskem
- orientace osy záběru – tj. nastavení orientačního úhlu φ (přesnost na 0,01^g),
- zaostření (pro mapovací práce je časté pevné zaostření měřických komor na ∞), určení expozice (pomocí expozimetru), nastavení clony a expozice
- kontrola záběru na matnici (případně v hledáčku), nastavení rámových údajů o snímku (A-levé nebo B-pravé stanovisko, normální nebo stočené případy L-vlevo, R-vpravo, číslo snímku nebo číslo základny)
- uzavření závěrky, založení kazety místo matnice, přitlačení snímku ke značkovému rámu
- kontrola horizontace a orientace komory
- **expozice**
- opětovná kontrola horizontace a orientace komory
- odtlačení snímku, vyjmutí kazety nebo přetočení filmu
- záměra komory a terče (co nejdříve – aby nedošlo ke změně osvětlení a stínů)
- opakování postupu na druhém stanovisku
- zápis a kontrola všech údajů o pořizovaných snímcích (např. do vhodného formuláře)

d) geodetické zaměření stanovisek, základny a vlíčovacích bodů

- zaměření provádíme dvakrát, nezávisle, s dvojnásobnou přesností než je požadovaná přesnost vyhodnocení
- souřadnice určujeme pouze pro levé stanovisko a pro vlíčovací body
- délku základny měříme alespoň dvakrát s třikrát vyšší relativní přesností, než je požadovaná přesnost vyhodnocení (většinou na *mm*)
- určení kontrolních oměrných (např. mezi zaměřenými VB – pro kontrolu měření a výpočtu souřadnic VB a mezi podrobnými body bez geodetického zaměření – pro kontrolu podrobného fotogrammetrického vyhodnocení)
- geodetické doměření zakrytých prostor (tj. míst, která nebude možné fotogrammetricky vyhodnotit)
- dokončení a kontrola náčrtu

Body *c)* a *d)* lze zaměnit podle aktuálních světelných podmínek – pro snímkování je vhodné osvětlení rozptýleným světlem dostatečné intenzity bez ostrých stínů. Při slunečném dni nejlépe mezi 10. až 15. hodinou, kdy jsou vržené stíny nejkratší.

3. Kancelářské práce

a) vyvolání (případně také skenování) snímků nebo jejich zobrazení a korekce na počítači; vyhotovení kontaktních kopií na film pro vyhodnocení a kopií na papír s vyznačením vlíčovacích bodů nebo totéž provedeme na výtiscích digitálních snímků

b) výpočet souřadnic a výšek stanovisek a vlíčovacích bodů z geodetického měření (dvojím nezávislým způsobem); uložení protokolu o výpočtu; vyhotovení seznamu souřadnic

c) fotogrammetrické vyhodnocení (podle zvolené metody)

d) editace a prezentace výsledků vyhodnocení

- tvorba a editace vektorové kresby na základě vyhodnocených bodů v CAD systémech;
- tvorba DMT (digitálního modelu terénu), případně také generování vrstevnic
- tvorba 3D modelů, vytváření pohledů, animací a průletů
- tvorba fotoplánu (vytváření mozaiky překreslených snímků)
- tisk (čárová kresba nebo plně barevný plošný tisk)

e) vyhotovení technické zprávy, která obsahuje:

- dobu pořízení snímků a jejich vyhodnocení
- použité přístroje a pomůcky (především komory a vyhodnocovací techniku)
- jména vyhodnocovatelů
- počty vyhodnocených bodů a posouzení přesnosti
- přílohy: kopie a zvětšeniny snímků (nebo paměťová média s digitálními snímky a jejich výtisky), záznamy měření, náčrtů a detailů z terénu, výpočetní protokoly, seznamy souřadnic vlíčovacích a vyhodnocených podrobných bodů, výsledky vyhodnocení (výkresy, fotoplány a jejich výtisky)

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 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**

- nepřenositelná, 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 používány 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)

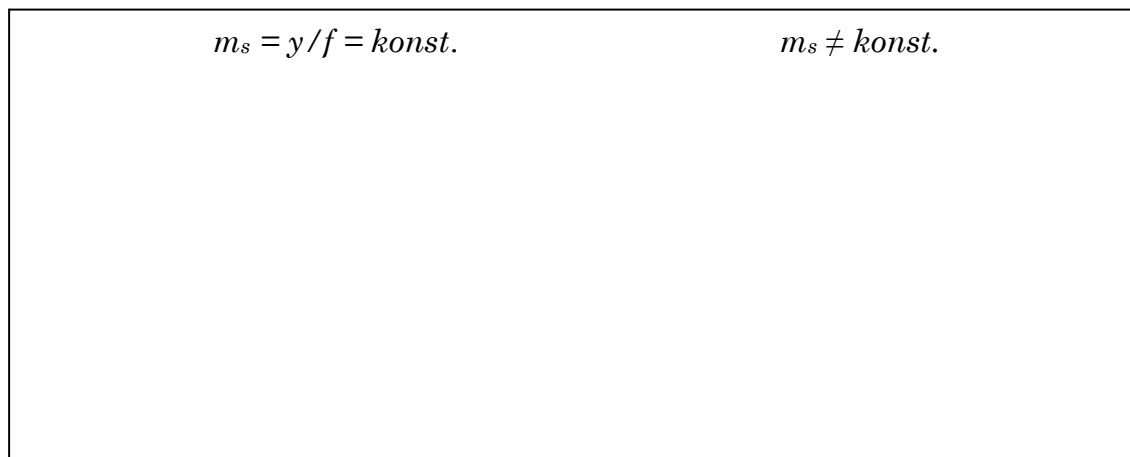
➤ panoramatické komory a videokomory

- *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.

3.4. Jednosnímková pozemní fotogrammetrie

Středový průmět rovinného objektu (bez prostorového členění) je za předpokladu osy záběru kolmé k objektu shodný s jeho pravoúhlým průmětem (oba obrazy se mohou lišit pouze svým měřítkem a středový průmět je stranově a výškově převrácený – negativ). Pokud ale bude osa záběru šikmá, mají různá místa na snímku různé měřítko a vzniká tak perspektivní obraz (rovnoběžky se sbíhají).



Tato zkreslení způsobená středovým průmětem z roviny objektu do roviny snímku je možné odstranit metodou jednosnímkové fotogrammetrie – **překreslením snímku** (rovnoběžnost přímek je obnovena, zobrazení je v požadovaném měřítku a není stranově a výškově převrácené).¹

Pokud je ale objekt prostorově členěný (všechny body neleží v jedné rovině), projeví se chyby v poloze bodu – **radiální posuny**, které metodou jednosnímkové fotogrammetrie odstranit nelze. Body ležící mimo rovinu překreslení se posouvají ve směru od středu snímku k okraji. Velikost těchto posunů odvodíme z podobnosti dvou pravoúhlých trojúhelníků:



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

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

Δy – velikost výstupku, Δr – velikost radiálního posunu ve skutečnosti,
 r' – radiální vzdálenost obrazu bodu **P** od hlavního bodu (středu snímku),
 f – konstanta komory, $\Delta \bar{r}$ – velikost radiálního posunu na fotonáplánu,
 m_F – měřítkové číslo fotonáplánu

¹ Překreslení se také nazývá *rektifikace obrazu*.

Z rovnice je zřejmé, že velikost radiálního posunu závisí především na vzdálenosti bodu od středu snímku r' a velikosti výstupku Δy . Dále platí, že komory se širokouhlými objektivy (kratší konstantou komory f) způsobují větší radiální posuny než komory s objektivy normálními.

Pokud má být rozhodnuto, zda je vhodné pro objekt s malým členěním použít jednosnímkovou fotogrammetrii, je třeba zjistit, jaká je maximální možná velikost výstupků na objektu (např. průčelí budovy), aby radiální posuny nepřekročily požadovanou přesnost. Rovnici upravíme na tvar:

$$\Delta y = \frac{\Delta \bar{r}}{r'} \cdot f \cdot m_F, \text{ potom pro maximální přípustný radiální posun v rovině fofoplánu}$$

např. $\Delta \bar{r}_{\max} = 1 \text{ mm}$, pro maximální radiální vzdálenost bodů na snímku $r' = 100 \text{ mm}$, pro konstantu komory $f = 100 \text{ mm}$ a pro měřítkové číslo fofoplánu $m_F = 100$ vychází maximální velikost výstupku $\Delta y_{\max} = 0,1 \text{ m}$.

Protože v jednosnímkové fotogrammetrii nelze radiální posuny odstranit, měli bychom alespoň zajistit, aby byl jejich vliv minimální: největší výstupky umísťujeme pokud možno do středu snímku a používáme objektivy s delší konstantou komory (menším obrazovým úhlem).²

➤ Práce v terénu – pořizování snímků

- pro snímkování lze použít analogové i digitální *měřické komory* (fototeodolity); v současné době jsou to ale především *digitální semiměřické* (např. *réseau*) a *neměřické komory*; lze používat automatické ostření a optické přiblížení obrazu (využívat digitální zoom nemá smysl);
- volíme raději menší *obrazový úhel* (tj. větší konstantu komory), takže stanoviště snímkování bude od objektu více vzdáleno, vzniknou ale menší zákryty za případnými výstupky, menší měrou se projeví vliv radiálních posunů a zkreslení objektivu budou také menší (zmenšení vlivu zkreslení má význam zvláště u neměřických komor – tj. fotoaparátů); volba obrazového úhlu ovlivní pouze vzdálenost snímkování nikoli rozlišení fofoplánu, pokud bude snímkována stále stejná část objektu;
- u velkých objektů je možné pro dosažení návaznosti překreslených částí pořádat více snímků s částečným překrytem; každý snímek (resp. rovina překreslení) musí mít vlastní vřícovací body;
- *osa záběru* má být alespoň přibližně kolmá k rovině snímkování objektu (zkreslení rovnoběžek na snímku vlivem perspektivy pak nebude příliš velké);
- pokud se na objektu vyskytuje výrazný výstupek, je vhodné umístit jej do středu snímku (ve středu snímku jsou radiální posuny minimální);
- volba *stanoviště snímkování* je dána především vzdáleností od objektu, která má vliv na rozlišení výsledného fofoplánu (rozměr pixelu ve skutečné velikosti v rovině objektu); polohu stanoviště a orientaci osy záběru není třeba určovat měření ani zakreslovat do náčrtu;

² V zástavbě může často nastat situace, kdy před objektem není dostatek prostoru a tento požadavek nemůže být splněn – použije se objektiv širokouhlý.

- v terénu je třeba zaměřit *minimálně 4 vřícovací body* ležící v rovině překreslení; běžně ale volíme nadbytečný počet (8-12 bodů);
- určování souřadnic vřícovacích bodů lze nahradit zaměřením *sítě délek* (4 strany čtyřúhelníku a alespoň jedna úhlopříčka); síť délek je možné ještě zjednodušit na pouze dvě měřené délky ve svislém a vodorovném směru (v tomto případě je však geodetické měření bez kontroly); pokud je možné zajistit kolmost osy záběru k rovině objektu, lze měřit pouze jednu délku pro určení měřítka fotoplánu (vzniká ale riziko chyb, které nebude možné při zpracování snímku zjistit); ve všech třech případech bez měření vřícovacích bodů je vhodné zajistit také vodorovný nebo svislý směr, který se zobrazí na snímku (např. jedna z délek by měla být ve svislém směru nebo použijeme závěs olovnice);
- do schématického *náčrtu* objektu zakreslíme umístění vřícovacích bodů nebo sít měřených délek a kontrolní oměrné (pro kontrolu výpočtu souřadnic vřícovacích bodů a pro kontrolu přesnosti výsledného fotoplánu); při použití přirozené signalizace doplníme ke každému bodu jeho detail s nejbližším okolím

➤ Vyhodnocení snímků

- při vyhodnocení řešíme vztah dvou rovin (středový průmět z roviny na rovinu) – roviny snímku a roviny mapy (fotoplánu);
 - pro vztah mezi fotoplánem a snímek platí tzv. **Pappova věta** o dvojpoměru čtveřice bodové: dvojpoměr délkových úseků mezi body na jedné přímce se zachovává;
 - vyhodnocení (překreslení snímku) se dříve provádělo na opticko-mechanických **překreslovačích**,³ v současné době se provádí **kolineární transformace rastru** – tj. digitální překreslení snímku na počítačích (pokud nebyly snímky pořízeny jako přímodigitální, jsou digitalizovány druhotně skenováním); transformace mění polohu (souřadnice) jednotlivých pixelů v digitálním obrazu;
 - výsledkem překreslení je **fotoplán**; často se doplňuje čárovou kresbou a popisem (provádí se vektorizace fotoplánu);
 - z překresleného snímku získáme jen polohu bodů v rovině fotoplánu; prostorové členění zanedbáváme;
 - v případě objektu členěného do více prostorových úrovní lze provést **překreslení po vrstvách**; každá vrstva (rovina překreslení) musí mít vlastní vřícovací body a překresluje se samostatně;
 - u velkých objektů se fotoplán sestavuje spojením více samostatně překreslených a maskováním oříznutých snímků – vzniká **fotomozaika**;
 - jednosnímková pozemní fotogrammetrie se používá především pro zhotovování fotoplánů průčelí prostorově nečleněných historických budov
- **dostupný software:** *Kokeš* (Gepro, ČR), *TopoL* (TopoL Software, ČR), *SIMphoto* (freeware, Ing. David Čížek, LFGM, Fakulta stavební ČVUT Praha), *MSR* (Rollei Fototechnic, Německo), *MicroStation - I/RAS C* (Bentley, USA)

³ Čočkovou rovníci pro zajištění ostroty obrazu v celé ploše překresleného snímku řeší *inverzor*, *průsečnicovou podmínku* pro zachování jedné společné průsečnice roviny snímku, průmětny a objektivu řeší *Carpentierovo zařízení*. Úkolem překreslení bylo pomocí tzv. *stupňů volnosti* sjednotit ze snímku promítané obrazy vřícovacích bodů s jejich polohou na *vřícovacím podkladu* (průmětně).

Na principu jednosnímkové fotogrammetrie jsou založeny dvě speciální metody: *metoda světelných řezů a zákres objektu do snímku*:

➤ **metoda světelných řezů**

- používá se pro zaměrování řezů (příčných profilů) chodeb, tunelů, kolektorů, štol a jiných tmavých prostor (např. jeskyní);
- výbava pro snímkování: kříž se zábleskovým zařízením a čtyřmi vřícovacími body na koncích ramen (místo speciálního zábleskového zařízení lze použít rotační laser ve svislé rovině), postačuje neměřická fotografická komora – digitální fotoaparát;
- pro překreslení snímků se použije známá poloha (souřadnice) vřícovacích bodů uměle osvětlených během expozice;
- překreslené profily slouží například pro dokumentaci rozvodů inženýrských sítí, výpočet kubatur nebo určování průjezdnosti tunelů

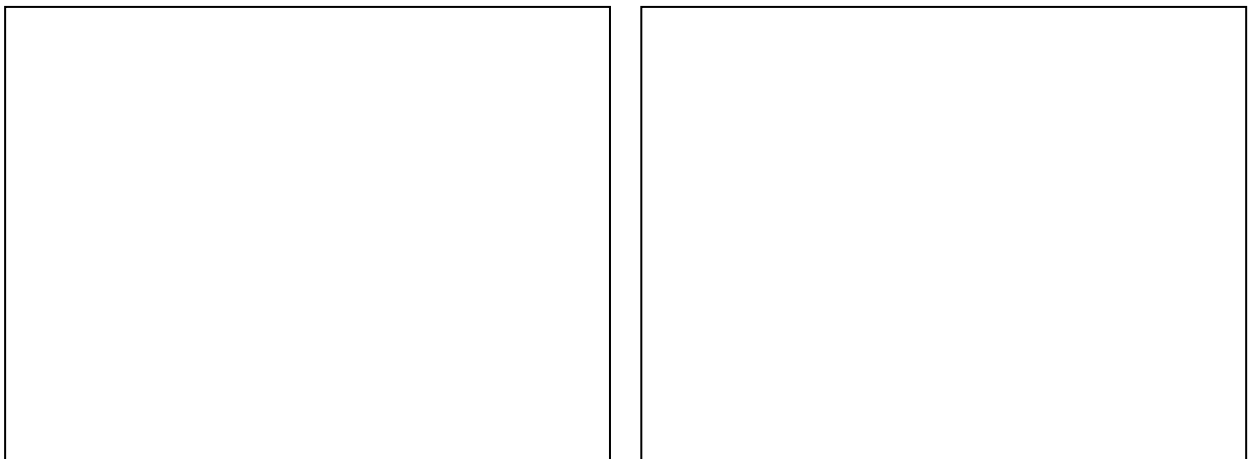
➤ **zákres objektu do snímku**

- používá se pro vizualizaci (znázornění) projektu stavebního objektu do prostoru budoucí stavby;
- je třeba pořídit měřický snímek se známými prvky vnitřní i vnější orientace (středový průmět, kterým vzniká obraz na snímku, je přesně definovaný, známá je také poloha stanoviska, odkud byl snímek pořízen, a orientace osy záběru);
- ve stejném středovém průmětu, ze stejného místa a se stejně orientovanou osu promítání se vykreslí středový průmět objektu (dříve graficky v současné době na počítači, např. ve vhodném CAD systému);
- takto získaná perspektiva se vloží do snímku (podle jeho rámových značek) a provede se retuš tak, aby vznikl realistický pohled na projektovanou stavbu ve skutečném prostředí;
- vizualizace slouží k prezentaci navrhované stavby pro veřejnost nebo pro investora stavby

3.5. Průseková pozemní fotogrammetrie

Nejstarší fotogrammetrická metoda původně využívaná pro mapování nepřístupných horských masivů vzdálených až několik kilometrů byla nahrazena po roce 1900 dvousnímkovými metodami. V 90. letech 20. stol. je znovuobjevena s příchodem semiměřických réseau komor, komor digitálních a spolu s možností využívat analytické početní metody vyhodnocení na počítačích. V současné době se používá naopak na kratší vzdálenosti několik desítek metrů (tzv. blízká fotogrammetrie) pro dokumentaci menších (především památkově chráněných) stavebních objektů, určování velikosti a tvarů předmětů, výrobků a výrobních technologií v průmyslu (výhodné pro velké rozměry nebo nepravidelné tvary) a také pro dokumentaci dopravních nehod.

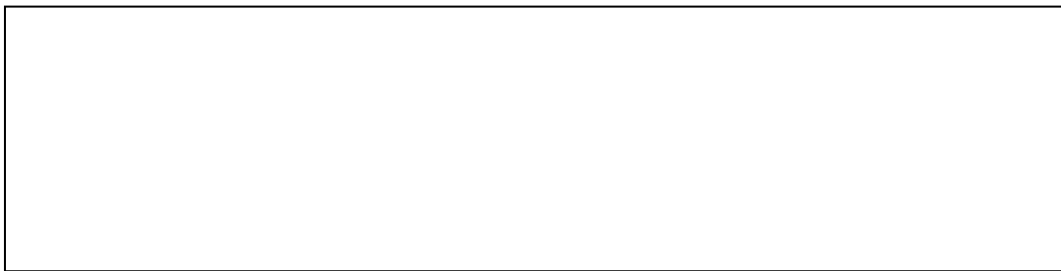
Principem metody je prostorové protínání vpřed řešené na měřických snímcích – graficky, z úhlů měřených na snímcích pomocí fotogoniometru a nyní analyticky: obecné početní vyhodnocení digitálních nebo digitalizovaných snímků na počítačích.



➤ Práce v terénu – pořízení snímků

- *komory* pro průsekovou fotogrammetrii: dříve fototeodolity (měřické komory), v současné době semiměřické (např. *réseau*) i neměřické komory (analogové a především digitální);
- nutné jsou *alespoň dva snímky* (vyhodnocení bez kontroly); vhodnější je více snímků (kontrola vyhodnocení a vyrovnání) – souřadnice podrobného bodu bude možné určit, pokud se zobrazí alespoň na dvou snímcích;
- *osy záběrů* se protínají přibližně uprostřed mapovaného území nebo objektu; snímky se pořizují kolem celého objektu pod různými úhly záběru, tak aby se snímky mohly při zpracování vzájemně propojit;
- *úhel protnutí os záběru* se mění spolu s velikostí základny, tj. vzdáleností mezi stanovisky snímkování (přibližně platí $b_{min} = y/3$);
- vhodný *úhel protnutí promítacích paprsků* je $60-120^\circ$ (ideálně 90°), neměl by být menší než 30° (resp. větší než 150°);
- *ohnisková vzdálenost* (konstanta komory) má být pro všechny snímky stejná – u neměřických komor je třeba zvolit optické přiblížení (zoom) a již jej neměnit; pokud možno volíme krajní polohy (tj. minimální nebo maximální obrazový úhel); automatické ostření (autofokus) musí být vypnuté – volíme manuální režim, zaostříme ručně (nejlépe na nekonečno) a již nepřeostřujeme;

- ostrost snímků je zajištěna díky tzv. *hloubce ostrosti*; proto volíme raději vyšší clonové číslo a delší doby osvitů; vhodné je použít režim „priorita času“, nastavit clonu a kontrolovat doby osvitů; nejdelší přípustné expozice pro snímání z volné ruky jsou $1/60$ až $1/30$ s; pro delší doby osvitů je třeba použít stativ, jinak dojde k rozmazání snímku; dobu osvitů je v případě potřeby možné zkrátit nastavením vyšší citlivosti – tzn. více než 100 ISO (pozor na příliš velký šum na digitálním snímku v případě volby vysokých citlivostí, tj. více než cca 800 ISO);¹
- vhodné je používat *kalibrovanou komoru* – kalibrace může být provedena zpracováním snímků testovacího pole v předchozím projektu;
- pro umístění a orientaci modelu potřebujeme alespoň *tři vlíčovací body* o třech známých souřadnicích [X, Y, Z] rovnoměrně rozložené na objektu; vhodnější je nadbytečný počet bodů (4 až cca 8);
- pokud není třeba umístit objekt v souřadnicovém systému, lze určování souřadnic vlíčovacích bodů nahradit zaměřením jedné délky, která určí zpracovávanému modelu správný rozměr (přesnost určení této délky bude mít vliv na kvalitu celého vyhodnocení); možné je použít například výtyčku nebo jiný délkový etalon; pro orientaci modelu je vhodné zajistit také vodorovný nebo svislý směr (např. pomocí závěsu olovnice nebo opět svislou výtyčkou);
- vlíčovací body mohou být *přirozeně nebo uměle signalizované*;
- vhodné je signalizovat také tzv. *spojovací body* tak, aby byly viditelné na každém snímku – při vyhodnocení budou snáze identifikovatelné (body přirozeně signalizované může být obtížné na snímcích v dostatečném počtu rozpoznat); není třeba určovat měřením jejich geodetické souřadnice;
- pokud se uměle signalizují i *body podrobné*, může být na krátké vzdálenosti, v oblasti tzv. velmi blízké fotogrammetrie (cca do 3 m) vyhodnocení dosaženo při velmi vysoké přesnosti ($0,1$ až $0,01$ mm); signalizace se provádí reflexními terčky nebo světelnou stopou (např. pomocí tzv. stroboskopu);
- vybrané body je možné signalizovat pomocí *kódových terčů*, které budou při zpracování snímků rozpoznány automaticky včetně jejich čísla;



¹Velikost *hloubky ostrosti* závisí na ohniskové vzdálenosti (podle použitého objektivu), zvolené cloně (tj. světelnosti objektivu) a na vzdálenosti zaostřovaného objektu. Při zaostření na nekonečno budou ostře zobrazeny objekty v tzv. **hyperfokální vzdálenosti** a všechny vzdálenější. Její hodnotu lze vypočítat ze vzorce $h = (f^2/K \cdot u) + f$, kde f – ohnisková vzdálenost, K – clonové číslo, u – průměr rozptylného kroužku, který volíme $0,02$ - $0,03$ mm. Zaostřit lze také přímo na hyperfokální vzdálenost a potom budou ostře zobrazeny všechny objekty od poloviny její hodnoty až do nekonečna. Pokud chceme určit hloubku ostrosti pro libovolné zaostření, vypočteme hodnotu přední hranice ostrosti $a_p = h \cdot a / (h + a - f) = a \cdot f^2 / (f^2 + K \cdot (a - f) \cdot u)$ a zadní hranice ostrosti $a_z = h \cdot a / (h - a - f) = a \cdot f^2 / (f^2 - K \cdot (a - f) \cdot u)$, kde a – je vzdálenost zaostřovaného objektu. Postup lze také obrátit a na základě poloviční hodnoty hyperfokální vzdálenosti vypočítat pro zaostření až do nekonečna potřebné clonové číslo $K = f^2 / 2 \cdot a_p \cdot u$, kde a_p je vzdálenost nejbližších objektů, které mají být zobrazeny ostře. Při výpočtech je samozřejmě nutné dosazovat všechny hodnoty ve stejných jednotkách.

- pro zpracování snímků mohou být požadovány přibližné hodnoty prvků vnější orientace (např. v náčrtu zaznamenaná poloha stanovisek a směr os záběru), souřadnice stanovisek snímkování ale není třeba zaměřovat;
- do *náčrtu* zakresluje se snímkaný objekt, přibližnou polohu stanovisek snímkování, orientaci os záběru a umístění vlíčovacích bodů; pro přirozeně signalizované vlíčovací body je vhodné vyhotovit jejich detaily pro přesnou identifikaci při zpracování;
- změříme *kontrolní oměrné*: alespoň jednu délku mezi vlíčovacími body (pro kontrolu správnosti jejich souřadnic) a jednu délku mezi dalšími prvky na objektu (pro kontrolu měřítka výsledného modelu objektu);

➤ Vyhodnocení snímků

- dříve grafické, později již početní, dnes analytické (obecné početní) řešení na PC využívající *prostorovou projektivní transformaci* nebo pro snímky s neznámými prvky vnitřní orientace (tzn. neměřické snímky pořízené nekalibrovaným fotoaparát) *DLT – direktní lineární transformaci*; pokud chceme touto transformací při vyhodnocení dodatečně určit prvky vnitřní orientace, je nutné v terénu zaměřit *min. 6 VB*; obě transformace řeší přímý vztah mezi snímkovými a geodetickými souřadnicemi;
- získáme *prostorové geodetické souřadnice* jednotlivých bodů [X, Y, Z]
- nelze využít stereoskopický vjem – je rušen vlivem protínajících se os záběru;
- možné je pouze *bodové vyhodnocení* – podrobné body je nutné vyhledat a označit na min. dvou snímcích; musejí být dobře přirozeně signalizované; body bez přirozené signalizace (např. na zakřivených plochách) nelze na snímcích jednoznačně rozpoznat a vyhodnotit – jejich identifikace je bez stereoskopického vjemu obtížná;
- proces vyhledávání je možné pro uměle signalizované body automatizovat a snížit tak pracnost vyhodnocení;
- současně s bodovým vyhodnocením je možné vyhotovit vektorovou kresbu;

➤ Příklad postupu zpracování (analytické početní řešení)

a) Tvorba modelu

- vložení snímků do projektu;
- zadání spojovacích bodů na všech snímcích (min. 6 na každém); nemají známé souřadnice – nejsou to body vlíčovací;
- výpočet modelu a orientace snímků;
- možnost přidání dalších snímků a opakování výpočtu.

Výpočet se provádí *iterací* – postupným přibližováním ke správnému výsledku a zpřesňováním hodnot opakovaným výpočtem (jako vstupní hodnoty mohou být požadovány alespoň přibližná poloha stanovisek snímkování a orientace os záběru – např. z náčrtu).

b) Orientace modelu

- zadání vlíčovacích bodů (nebo alespoň jedné známé délky a směru);
- výpočet polohy, orientace a měřítka modelu (současně jsou určeny souřadnice stanovisek snímkování a orientace os záběru – tj. prvky vnější orientace v geodetickém systému souřadnic).

Souřadnice stanovisek se počítají ze známých souřadnic vlíčovacích bodů. Tento krok výpočtu je možné zjednodušeně vysvětlit jako *prostorové protínání zpět*.

c) Vyhodnocení podrobných bodů

- vyhledání a označení všech podrobných bodů na objektu (po zadání totožného bodu na dvou snímcích se na dalších zobrazí promítací paprsek pro usnadnění identifikace);
- současně s vyhodnocením bodů je možné vytvářet mezi podrobnými body vektorovou kresbu – vzniká drátová kostra modelu objektu.

Ze známých souřadnic stanovisek snímkování jsou určovány souřadnice podrobných bodů *prostorovým protínáním vpřed* promítacích paprsků řešeným pomocí snímků.

- **dostupný software:** *PhotoModeler* (Eos Systems, Kanada), *CDW* (Rollei Fototechnic, Německo), *V-STAR 3D* (Geodetic Systems, USA), *Insight 3d* (Analytical Graphics, USA), *iWitness* (Photometrix, Austrálie)

Některé programy využívají pro zpracování snímků pozemní fotogrammetrie současně metody průsekové i dvousnímkové – nejprve jsou na všech snímcích vyhledány s vysokou pravděpodobností totožné body (vzniká tzv. řídké mračno spojovacích bodů – *Sparse Point Cloud*) a na základě nich jsou metodou *průsekové fotogrammetrie* snímky orientovány – vzniká model (vyžadovány jsou vhodné úhly protnutí os záběru a promítacích paprsků). Následuje generování velkého množství podrobných bodů, které tvoří povrch snímaných objektů (tzv. husté mračno bodů – *Dense Point Cloud*), metodou obrazové korelace (automatické vyhledávání i nesignaizovaných totožných bodů). Tato metoda známá z *dvousnímkové fotogrammetrie* vyžaduje snímky s alespoň přibližně rovnoběžnými osami záběru, protože pro vyhledání velkého množství totožných bodů je mezi porovnávanými snímky vyžadován vysoký koeficient korelace (koeficient podobnosti obrazů). Pro tento způsob vyhodnocení je třeba vhodně kombinovat snímky s protínajícími se osami (pro vytvoření kvalitního a stabilního modelu) se snímky s osami téměř rovnoběžnými (pro generování podrobných bodů na povrchu objektu).² Tyto technologie jsou převzaty z metod letecké fotogrammetrie, pro které původně vznikly (digitální analytická aerotriangulace a automatický sběr dat pro tvorbu digitálního modelu terénu).

- **software pro tvorbu mračna bodů:** *VisualSFM* (Changchang Wu), *VripPack* (The Board of Regents of The University of Washington and the Board of Trustees of The Leland Stanford Junior University)

² Vhodná konfigurace pro splnění obou podmínek zahrnuje několik snímkových dvojic nebo celých řad snímků s rovnoběžnými osami záběru – vzájemně se ale osy záběru jednotlivých skupin snímků (dvojic nebo řad) musejí protínat pod vhodným úhlem.

3.6. Dvousnímková pozemní fotogrammetrie

Ze dvou snímků získáme pomocí umělého stereoskopického vjemu tři prostorové souřadnice (polohopis i výškopis mapy). Na levém snímku měříme *snímkové souřadnice* a pravý slouží k určení *horizontální paralaxy* nebo měříme *souřadnice modelové*. *Vertikální paralaxa* je ve většině případů odstraňována – podmínka vzniku stereoskopického vjemu. Moderní analytické a digitální metody umožňují při měření na stereoskopickém modelu určovat přímo *souřadnice geodetické* (jejich výpočet musí probíhat v reálném čase). Při využití stereoskopického vjemu je možné *bodové i liniové vyhodnocení*.

Pro měření na stereoskopickém modelu používáme *prostorovou měřickou značku* – *skutečnou*, tvořenou jedním svítícím bodem umístěným přímo na stereoskopickém modelu vytvořeném pomocí dvojitého projektoru, nebo *neskutečnou* (zdánlivou), která vniká při pozorování dvou samostatných značek umístěných v rovině snímku nebo promítaných do pozorovací roviny přístroje. Při stereoskopickém pozorování snímkové dvojice umísťujeme obě značky na obrazy stejného bodu na levém i pravém snímku, a potom vnímáme jedinou měřickou značku umístěnou na prostorovém modelu. Měřické značky mívají nejčastěji tvar tečky o průměru od $0,04 - 0,06 \text{ mm}$ až do $0,1 \text{ mm}$. Měření snímkových souřadnic a paralax tímto způsobem dosahuje přesnosti $0,01$ až $0,001 \text{ mm}$ (tj. 10 až $1 \mu\text{m}$) v měřítku snímku.

Podle orientace os záběru rozlišujeme tři typy stereodvojic: normální, vlevostočené a vpravostočené (obvykle $\varphi = 35^\circ$ nebo až *do* 50°). Protože středy vstupních pupil neleží nad stanovisky základny A, B (tj. na točné ose měřické komory), je třeba pro určení jejich geodetických souřadnic znát ***excentricitu vstupní pupily*** – tj. vodorovnou vzdálenost mezi točnou osou měřické komory a bodem *O*.



Osy záběrů mají být pro získání kvalitního stereoskopického vjemu rovnoběžné. Pokud není tato podmínka dodržena, rozlišujeme případy *konvergentní* (osy se mírně sbíhají) nebo *divergentní* (osy se mírně rozbíhají). Stereovjem se zhoršuje, je omezen jen na blízké okolí měřické značky nebo zcela zaniká.

Využití dvousnímkových metod je především pro práce vyšší přesnosti a pro vzdálené objekty. Lze vyhodnotit jakýkoli, i členitý, ale nezarostlý terén, skály, lomy, skládky nebo průčelí budov i vnitřní prostory. Dosah metody je nejvýše 500 m .

➤ **Odvození rovnic základních stereodvojic**

Pro normální případ a vodorovné osy záběru udávají rovnice základních stereodvojic převodní vztah mezi měřenými *snímkovými souřadnicemi*, *horizontální paralaxou* a *modelovými souřadnicemi*.



Z podobnosti trojúhelníků platí:¹

$$\text{a) } \Delta ABP \sim \Delta P'(P'')A \Rightarrow \frac{y_P}{b} = \frac{f}{p}, \quad y_P = \frac{f}{p} \cdot b$$

$$\text{b) } \Delta AQP \sim \Delta P'H'A \Rightarrow \frac{x_P}{y_P} = \frac{x'}{f}, \quad x_P = y_P \cdot \frac{x'}{f} = \frac{f}{p} \cdot \frac{x'}{f} \cdot b = \frac{x'}{p} \cdot b$$

$$x_P = \frac{x'}{p} \cdot b$$

c) ve sklopení svíslé roviny proložené promítacím paprskem do půdorysny je možné obdobně odvodit další vztah:

$$\frac{z_P}{y_P} = \frac{z'}{f}, \quad z_P = y_P \cdot \frac{z'}{f} = \frac{f}{p} \cdot \frac{z'}{f} \cdot b = \frac{z'}{p} \cdot b$$

$$z_P = \frac{z'}{p} \cdot b$$

¹ Pro zjednodušení odvození je v obrázku ztotožněna poloha stanoviště A (resp. B) a střed vstupní i výstupní pupily O a O'.

- **Stočené případy** lze převést na normální pomocí orientačního úhlu φ .



Pro **základnu normálního případu** platí rovnice $\bar{b} = \overline{AD} = \overline{AC} + \overline{CD}$,

$$\overline{AC} = b \cdot \cos \varphi, \quad \overline{CD} = \frac{x''}{f} \cdot b \cdot \sin \varphi$$

$$\bar{b} = b \cdot \cos \varphi + \frac{x''}{f} \cdot b \cdot \sin \varphi, \quad \bar{b} = b \cdot \left(\cos \varphi + \frac{x''}{f} \cdot \sin \varphi \right)$$

Druhý člen je odvozen z podobnosti trojúhelníků $\Delta BCD \sim \Delta BHP$.

Výpočet základny normálního případu je třeba provést pro každý určovaný bod.

- **Střední chyby** určených modelových souřadnic:

Ze střední chyby stereoskopického pozorování $m_y = \frac{y^2}{b} \cdot m_\gamma$ a ze vztahu mezi středními chybami konvergenčního úhlu a měřené horizontální paralaxy $m_\gamma = \frac{m_p}{f}$ získáváme střední chybu v prostorové souřadnici y : $m_y = \frac{y^2}{b} \cdot \frac{m_p}{f}$, přitom přesnost určení horizontální paralaxy p bývá $0,01$ až $0,001$ mm (tj. 10 až 1 μ m).

Pro střední chyby zbývajících modelových souřadnic platí

$$m_x = m_y \cdot \frac{x'}{f} \quad \text{a} \quad m_z = m_y \cdot \frac{z'}{f}, \quad \text{odtud můžeme vyvodit tato tvrzení:}$$

- přesnost prostorové souřadnice y klesá s druhou mocninou vzdálenosti;
- přesnost se zvýší zvětšením základny b a konstanty komory f ;
- přesnost určení ostatních modelových souřadnic x a z závisí na přesnosti určení prostorové souřadnice y , na velikosti měřené snímkové souřadnice (x' nebo z') a na velikosti konstanty komory f ;

Další chyby působící na modelové souřadnice vznikají *nepřesným určením délky základny*, *nepřesným určením prvků vnitřní orientace* – nepřesně určenou konstantou komory, polohou hlavního bodu, neúplným odstraněním radiální distorze a vlivem nedostatečného přilnutí fotografického materiálu ke značkovému rámu; a dále *nepřesně určenými úhlovými prvky vnější orientace* – nepřesným nastavením orientačního úhlu φ (orientace a rovnoběžnosti os záběru), nepřesným nastavením úhlů ω , κ (např. chybným urovnáním křížových libel).

Na výsledné geodetické souřadnice má vliv také přesnost určení lineárních prvků vnější orientace – geodetických souřadnic středu vstupní pupily na levém stanovisku $O [X_0, Y_0, Z_0]$.

➤ Orientace stereoskopické dvojice snímků

Před každým vyhodnocením se provádí **orientace snímkové dvojice**. V pozemní fotogrammetrii jsou ve většině případů prvky vnitřní i vnější orientace známy. Pokud naopak vstupují do vyhodnocení jako neznámé hodnoty, jsou určeny výpočtem s vyrovnáním z nadbytečného počtu vličovacích bodů se známými souřadnicemi v soustavě snímkových i geodetických souřadnic.

Postup orientace snímkové dvojice – příprava snímků na vyhodnocení:

- 1) **Vnitřní orientace** – pomocí známých prvků vnitřní orientace obnovíme středové promítání, kterým snímky vznikly:
 - na analogovém vyhodnocovacím stroji nastavíme hodnotu konstanty komory a pomocí rámových značek dostředíme snímky v nosičích;
 - na analytických strojích a digitálních fotogrammetrických stanicích načteme textový soubor s údaji o velikosti konstanty komory, poloze hlavního bodu (např. jako souřadnice rámových značek nebo rohových pixelů) a průběhu radiální distorze ve formě konstant členů polynomu (vyjadřuje vliv distorze na měřené snímkové souřadnice v závislosti na radiální vzdálenosti);
 - u digitálních (nebo digitalizovaných) snímků provedeme afinní transformaci na rámové značky – snímky získávají konkrétní metrický rozměr, případně je zmírněn vliv srážky snímku;
- 2) **Vnější orientace** – prvky vnější orientace jsou většinou známy (poloha stanovisek na základně známé délky, orientace rovnoběžných os záběru).²
 - a) **relativní orientace** (vzájemná)
 - vzájemnou orientací obou snímků *odstraníme vertikální paralaxy*, získáme *stereoskopický vjem* a obecně orientovaný *prostorový model* na kterém je možné měřit *modelové souřadnice* (resp. *snímkové souřadnice a paralaxy*);
 - obnovujeme vzájemné postavení snímků, jaké bylo při jejich pořízení terénu – pokud byl při pořízení snímků na obou stanoviscích úhel κ nastaven na nulu, je možné použít *orientaci podle rámových značek* (tzn. spojnice rámových značek jsou vzájemně rovnoběžné);
 - v ostatních případech používáme *identické body* – totožné na levém a pravém snímku, bez známých geodetických souřadnic (nejsou potřeba body vličovací);
 - b) **absolutní orientace**
 - *určíme posunutí, pootočení a změnu měřítko modelu* vzhledem k referenčnímu geodetickému systému nebo mapě, tzn. umístíme prostorový model v soustavě geodetických souřadnic tak, aby bylo možné určovat *geodetické souřadnice podrobných bodů*;

² Pokud mají být ze souřadnic stanoviska komory (tj. bodu A nebo B) vypočteny geodetické souřadnice středu vstupní pupily, je třeba znát také **excentricitu vstupní pupily**.

- získáme 7 prvků transformačního klíče *prostorové podobnostní transformace* (tři posuny, tři otoční a změnu měřítka) – v pozemní fotogrammetrii bývají tyto hodnoty určeny již při měření v terénu jako prvky vnější orientace;
- potřebujeme minimálně *tři vřícovací body* se známými geodetickými souřadnicemi – pokud byly prvky vnější orientace přesně určeny v terénu mají vřícovací body pouze kontrolní charakter (případně se použijí pro zpřesnění měřených prvků vnější orientace)

Nové počítačové systémy provádějí vnější orientaci v jednom kroku metodou **vyrovnání paprskových svazků** – využívají přímého matematického vztahu mezi snímkovými a geodetickými souřadnicemi.

➤ **Metody vyhodnocení pozemní stereofotogrammetrie**³

a) **graficky**

Snímkové souřadnice a horizontální paralaxu měříme na stereokomparátoru a geodetické souřadnice zjišťujeme graficky v měřítku připraveného podkladu.

b) **analogové vyhodnocení – mechanicky**

Na *analogových vyhodnocovacích strojích* je třeba obnovit středové promítání a vzájemné postavení snímků v prostoru, jaké bylo při jejich pořizování (tzn. obnovit známé prvky vnitřní a vnější orientace) – vytváříme analogii (obdobu) stavu v terénu.

Mechanickým řešením rovnic základních stereodvojic zjišťujeme *modelové souřadnice*, které mohou být po připojení kreslicího stolu s vřícovacím podkladem převedeny na *souřadnice geodetické* a přímo kresleny do *originálu mapy* (mechanické řešení podobnostní transformace v měřítku mapy).

Možné je *bodové i liniové vyhodnocení* pouze s *grafickým záznamem* na kreslicím stole: originál polohopisu a výškopis v podobě vrstevnic (zejména v rovinatém terénu mohou vrstevnice vznikat také tzv. bodováním a ruční interpolací). Výškopis se doplňuje kótami. Vyhodnocení je ale možné jen pro stereoskopické dvojice snímků (rovnoběžné osy záběru, normální nebo stočený případ s vodorovnými osami záběru; pouze pro vybrané sklony lze zpracovat snímky pomocí analogového počítače sklonů).

c) **analogové vyhodnocení – početně** (semianalytické)

Na *analogových strojích* měříme a registrujeme *modelové souřadnice* (zaznamenáváme registračním zařízením nebo do připojeného počítače), které jsou následně převedeny *podobností prostorovou transformací* do geodetického systému. Vyhodnocení může být *pouze bodové*.

d) **analytické vyhodnocení – početně**

Na *stereokomparátorech* měříme a do počítače registrujeme *snímkové souřadnice* x^s , z^s levého snímku a *horizontální paralaxu* p . Následně přímým převodem pomocí *prostorové projektivní transformace* získáme geodetické souřadnice. Pokud použijeme nepřímý převod souřadnic, je třeba z měřených hodnot zjistit modelové souřadnice a následně je převést do geodetického systému. Vyhodnocení může být *pouze bodové*.

³ Některé metody je možné použít i pro průsekovou fotogrammetrii.

e) **analytické vyhodnocení – na analytických strojích**

Původně bylo určeno pro leteckou fotogrammetrii – v současné době je to nejpřesnější metoda vyhodnocení všech analogových snímků s citlivými vrstvami (tedy nedigitalizovaných). Analytický stroj vzniká *propojením přesného stereokomparátoru a počítače* – principem je řešení *prostorové projektivní transformace* v reálném čase.

Lze vyhodnocovat téměř libovolně orientované snímky – omezením je pouze dodržení podmínek pro vznik stereoskopického vjemu (u konvergentních os záběru lze stereovjem získat jen v malém okolí vyhodnocovaného bodu).

Vyhodnocení je možné *bodové i liniové*. Vzniká *vektorová kresba polohopisu a výškopis* je zaznamenáván výhradně *ve formě DMT – digitálního modelu terénu*.

f) **digitální vyhodnocení**

Využíváme principů *analytické metody* pro digitální (nebo skenováním digitalizované) snímky vyhodnocované na počítačích – *digitálních fotogrammetrických pracovištích (stanicích) DPW (Digital Photogrammetric Workstation)*.

Vyhodnocení může být *bodové i liniové* a liší se podle způsobu měření snímkových souřadnic, bez nebo s využitím stereovjemu (průřezová nebo stereofotogrammetrie). Možnost volby závisí na způsobu, jakým byly snímky pořízeny v terénu. Převod mezi *snímkovými a geodetickými souřadnicemi* je řešen pomocí *prostorové projektivní transformace* (pokud nejsou známy prvky vnitřní orientace, použije se DLT – *direktní lineární transformace*).

- **software pro DPW:** *PhoTopoL* (TopoL Software, ČR), *VSD – Video Stereo Digitiser* (AGH Krakow, Polsko), *ImageStation* (Z/I Imaging – Intergraph), *DVP – Digital Video Plotter*, *LPS – Leica Photogrammetry Suite* (Leica Geosystems), *Helava - Socet Set* (LH Systems – Leica), *ERDAS Imagine - Stereo Analyst* (ERDAS – Leica, Intergraph)

K výslednímu **plánu** nebo **mapě** přikládáme technickou zprávu, seznamy souřadnic vlíčovacích a podrobných bodů, situační náčrt (schéma terénu nebo objektu, rozložení základů a orientace os záběru, umístění vlíčovacích bodů), detaily vlíčovacích bodů a kontaktní kopie, zvětšeniny nebo výtisky digitálních snímků s vyznačenými vlíčovacími body.

Speciální metoda dvousnímkové pozemní fotogrammetrie:

➤ **metoda časové základny**

- používá se pro určování deformací (přetvoření) nejčastěji u stavebních objektů a v průmyslu (např. konstrukcí mostů, potrubí, apod.)
- snímáme jeden objekt dvakrát v časovém odstupu (např. před zátěží a zatížený) ze stejného stanoviska a se stejnou orientací osy záběru
- sledujeme nastalé změny – posuny a deformace, které se na snímcích jeví jako tzv. **deformační paralaxy**
- po otočení snímků o 90° lze tyto paralaxy měřit jako horizontální a pomocí měřítkového čísla snímku vypočítat velikost deformace ve skutečnosti

3.7. Vyhodnocovací přístroje a systémy pro pozemní fotogrammetrii¹

Fotogrammetrické vyhodnocovací přístroje umožňují měřit nebo z měřených hodnot získávat polohu bodů v prostoru. Před vyhodnocením je třeba obnovit pomocí známých prvků vnitřní a vnější orientace tvar, polohu a směr paprskových svazků snímkové dvojice (tj. středové promítání, kterým snímky vznikly). Poloha určovaného bodu je potom dána jako průsečík promítacích paprsků z levého a pravého snímku.

➤ analogové stroje

byly vyráběny od počátku do osmdesátých let dvacátého století,² kdy byly nahrazeny analogovými stroji a později digitálními metodami vyhodnocení; prakticky po dobu 80ti let byly analogové stroje nejpoužívanější vyhodnocovací technikou a na našem území pomocí nich vznikla většina map středního měřítká; při jejich konstrukci se používala velmi přesná mechanika a kvalitní optika; využívají optickou, mechanickou nebo opticko-mechanickou projekci pro obnovení středového promítání a řešení rovnic základních stereodvojic, pomocí kovových prostorových řídicích tyčí v kardanových závěsech nebo kovových pravítek ve dvou oddělených rovinách (např. podle principu Zeissova paralelogramu); pro pohyb v prostorovém modelu jsou vybaveny dvěma ručními koly (souřadnice x , y) a jedním nožním kotoučem (souřadnice z); záznam vyhodnocení byl převážně grafický; na připojeném kreslicím stole se vykresluje originál polohopisu a výškopis v podobě vrstevnic nebo se mohou modelové souřadnice zobrazované na mechanických počítadlech registrovat (např. do počítače);

- **Stereoautograf 1318** (Zeiss, od r. 1954)³
určen pro zpracování snímků z komory *PhoTheo 19/1318*;
maximální rozměr snímků 13×18 cm (pouze na skle), $f = 157 - 198$ mm;
výsledkem vyhodnocení je originál mapy vznikající na mechanicky připojeném kreslicím stole (grafický záznam vyhodnocení)
- **Technokart** (Zeiss, od r. 1969)
navazuje na výrobní řadu měřických komor *UMK* a *SMK*;
maximální rozměr snímku 23×23 cm, $f = 50 - 310$ mm;
pro grafický záznam vyhodnocení je připojen kreslicí stůl,
pro číselný záznam vyhodnocení lze připojit registrační zařízení nebo počítač

Další výrobci: *Opton* – **Teragraf**, *Wild* – **Autograf**

Modernizace těchto přístrojů byla provedena nahrazením mechanických převodů (uvnitř stroje a ze stroje na kreslicí stůl) **selsyny** (elektromotory) – pootočení selsynu vysílacího se přenáší na selsyn přijímací indukovaným elektrickým proudem; je tak dosaženo odstranění mrtvých chodů mechanických převodů: kardanů a ozubených kol.

¹ Většina uvedené přístrojové techniky je určena pro metody dvousnímkové fotogrammetrie.

² Roku 1908 podle návrhu rakouského důstojníka, *npor. Eduarde von Orel* (1877-1941, z matčiny strany původem z Moravy) zkonstruoval *Dr. C. Pulfrich* (na základě stereokomparátoru) ve firmě *Rudolf und August Rost* prototyp prvního analogového stroje **Autostereograf**.

³ Prakticky byl analogový stroj dořešen v letech 1909-1911 a následně vyráběn pod názvem **Stereoautograf** v závodech *Carl Zeiss Jena*.

➤ monokomparátory

měří snímkové souřadnice na jednom snímku;
nelze využít stereoskopický vjem, proto je při měření zhoršená identifikace bodů;
přístroje jsou konstrukčně jednoduché, a tím je zajištěna vysoká vnitřní přesnost měření $1 \mu\text{m}$;
měřené souřadnice mohou být registrovány

- **Ascorekord (Zeiss)**

➤ stereokomparátory

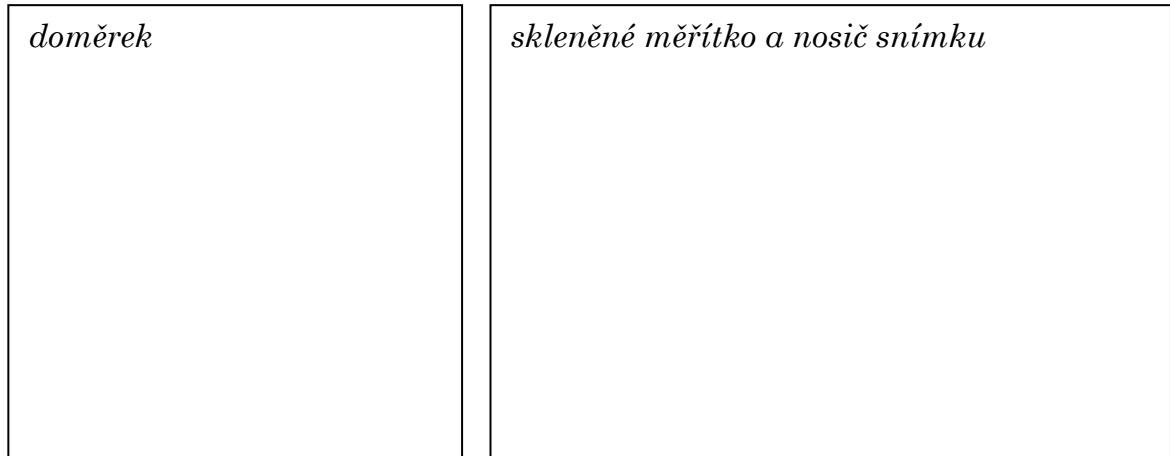
jsou od roku 1901 až posud nejpřesnějšími zařízeními pro měření na analogových snímcích s citlivými vrstvami;⁴
využívají stereoskopický vjem pro dobrou identifikaci bodů;
po nastavení zdánlivé měřické značky na měřený bod odečteme nebo registrujeme snímkové souřadnice levého snímku a pomocí pravého snímku horizontální paralaxu (v případě potřeby je možné měřit i paralaxu vertikální)

- **Steko 1818 (Zeiss, od r. 1953)**
patří do výrobní řady *PhoTheo 19/1318, Stereoautograf 1318*,
maximální rozměr snímku je $18 \times 18 \text{ cm}$;
měří souřadnice s přesností odečtu na $0,01 \text{ mm}$ a paralaxu na $0,005 \text{ mm}$ (odhadem na $0,001 \text{ mm}$);
měření je možné z negativů a pozitivů na skle a na filmu nebo i z pozitivních kopií na papíře (přístroj umožňuje použít horní i spodní osvětlení);
ovládá se pouze ručními koly; souřadnice a paralaxy se odečítají na kovových stupnicích bez možnosti registrace
- **Stekometr (Zeiss, od r. 1964)**,
patří do výrobní řady *UMK, SMK, Technokart*;
maximální rozměr snímku je $23 \times 23 \text{ cm}$ (pouze na průsvitné podložce);
měří souřadnice i paralaxy s přesností na $0,002 \text{ mm}$ ($2 \mu\text{m}$);
ovládá se dvěma páry ručních kol a nožními kotouči;
v konstrukci stroje jsou použity selsyny;
má možnost registrace
- **Dicometer (Zeiss, od r. 1990)**
přesnost měření $0,001 \text{ mm}$ ($1 \mu\text{m}$) je technologickou mezí mechanické konstrukce vyhodnocovacích strojů;
ovládá se ručními koly pro snímkové souřadnice a nožním kotoučem pro paralaxu;
umožňuje přímý výstup měřených hodnot do počítače

⁴ První návrh a konstrukci provedl r. 1901 Dr. Carl Pulfrich (1858-1929) spolupracovník závodů Carl Zeiss Jena.

- **PK-1 (Opton)**

přesnost měření $0,001\text{ mm}$ ($1\ \mu\text{m}$) je dosažena jednoduchostí konstrukce na základě Abbeho principu – počet mechanických součástí je minimální; snímky se pohybují v nosičích nad pevnými skleněnými měřítky a snímkové souřadnice jsou odečítány pomocí **lineárních snímačů impulzů**



Výstupní signál je digitalizován na potřebný počet úrovní. Interpolací lze u moderních přístrojů vyrobených na základě tohoto principu dosáhnout přesnosti odečtu až $0,1\ \mu\text{m}$.

➤ **digitální komparátory**

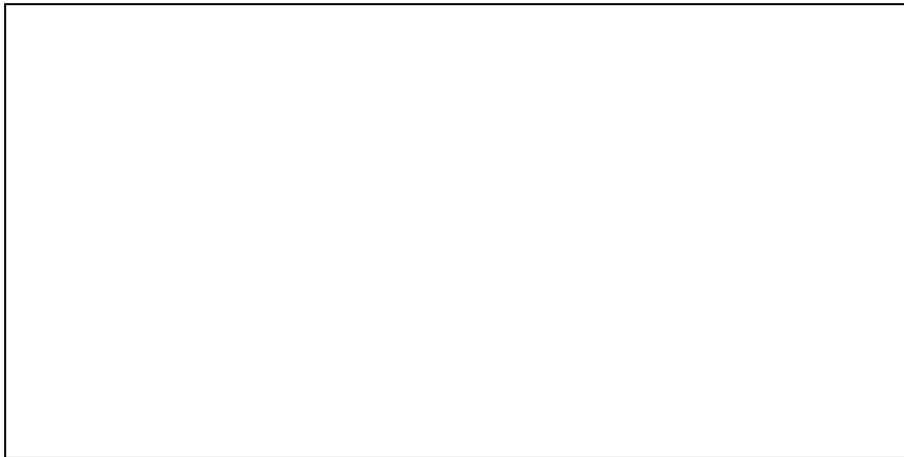
měření provádíme na digitálních snímcích v počítači;
snímkové souřadnice jsou dané polohou pixelu v digitálním obrazu;
metrický rozměr obrazu je určen afinní transformací na známou polohu rámových značek;
velikost jednoho obrazového bodu – pixelu se pohybuje od 3 do $12\ \mu\text{m}$ (např. podle velikosti jednoho čidla – prvku CCD použitého fotogrammetrického skeneru);
přesnost měření se zvyšuje pomocí **subpixelové transformace** na $0,1$ až $0,001$ pixelu (tj. dělením jednoho pixelu na $1/10$ až $1/1000$) – provádí se interpolace subpixelové polohy z hodnot sousedních pixelů

➤ **analytické stroje (Analytical Plotters)**

patent finského vědce a fotogrametra *Uuno (Uki) Vilho Helava*⁵ existuje již od roku 1956, první konstrukce s označením AP/C vznikla v 1964; výroba a rozšíření analytických strojů ale byly znemožněny nedostatečnou kapacitou tehdejší výpočetní techniky;
k jejich praktickému uplatnění došlo až v průběhu 70. a v 80. let 20. stol. díky využití osobních počítačů – *Personal Computer (PC)*;
pracují na základě převodu modelových souřadnic na snímkové (lineární perspektiva) a přímého vztahu mezi snímkovými a geodetickými souřadnicemi (prostorová projektivní transformace);
vyhodnotit je možné i snímky s protínajícími se osami záběru, ovšem bez možnosti využít umělý stereoskopický vjem

⁵ Zakladatel firmy *Helava Associates* (dnes BAE Systems), působil také v Kanadě, Itálii a USA.

Skládá se ze dvou základních částí: přesného stereokomparátoru a počítače.



Pohyb snímků je ovládán nepřímě – zprostředkovaně přes počítač: pomocí stereoskopu pozorujeme oba snímky a v prostorovém modelu se pohybujeme pomocí dvou ručních kol a nožního kotouče (nebo pohybem fotogrammetrické myši s točítkem pro třetí souřadnici). Otáčení ovládacích prvků je zachyceno pomocí **rotačních snímačů impulzů** a přenášeno elektrickým signálem do počítače, kde se modelové souřadnice přepočtou na snímkové a jsou vydávány pokyny pro pohyb nosičů se snímky pomocí krokových elektromotorů. Současně počítač sleduje polohu snímků **pomocí lineárních snímačů impulzů** a zjištěné snímkové souřadnice jsou porovnávány s požadovanými hodnotami. Tento cyklus se opakuje alespoň 50x za vteřinu, takže vyhodnocovatel má dojem přímého ovládní měřické značky – výpočty (řešení soustavy čtyř rovnic) musí probíhat v reálním čase. Naměřené snímkové souřadnice jsou okamžitě převáděny do geodetického systému, takže výstupem je skutečný tvar, velikost a poloha vyhodnocovaných objektů (geodetické souřadnice).

Rotační snímač impulzů se skládá ze skleněného kotoučku s neprůsvitnými značkami na obvodu umístěného na ose ovládacího prvku, zdroje světla (laserová dioda) a čidla (fotodiody), které převádí dopadající světlo na elektrické impulzy zaznamenávané a digitalizované na požadovaný počet úrovní.



- **Dicomat (Zeiss)**
konstruován na základě přesného stereokomparátoru *Dicometer*;
maximální formát snímků 24x24 cm;
přesnost ve snímkových souřadnicích 2 μ m
- **Planicomp P3 (Opton – Zeiss)**
konstruován na základě přesného stereokomparátoru *PK-1* s lineárními snímači impulzů; přesnost ve snímkových souřadnicích 1 μ m

- **SD2000, SD3000 (Leica)**
maximální formát snímků až 25×25 cm;
snímky jsou založeny ve dvou rovinách nad sebou;
přesnost ve snímkových souřadnicích $1 \mu\text{m}^6$

➤ **digitální fotogrammetrická pracoviště**

DPW – Digital Photogrammetric Workstation

Digitální nebo skenováním digitalizované stereoskopické snímky i snímky průsekové (silně konvergentní) lze vyhodnotit na **digitálních stereoskopických pracovištích** (stanicích). Základní součástí je výkonný počítač s **hardwarovými doplňky pro stereoidění** (krystalové nebo polarizační brýle) většinou vybavený dvěma monitory (jeden pro uživatelské rozhraní ovládacího software a druhý pro stereoskopický vjem). Ovládacími prvky jsou buď dvě ruční kola a nožní kotouč s rotačními snímači impulzů nebo dvouruční vícetlačítková 3D fotogrammetrická myš s točítkem pro ovládání modelové souřadnice z. Vždy je třeba počítat s velkými objemy zpracovávaných dat (řádově MB až GB na jeden snímek), proto jsou nutná datová úložiště s dostatečnou kapacitou a zajištění vhodného přenosu dat.

Ovládací software bývá modulární a podle pořizovaných modulů lze zpracovávat prakticky libovolnou úlohu jednosnímkové, průsekové nebo dvousnímkové fotogrammetrie (pozemní i letecké). Možná je aerotriangulace (tj. orientace snímků na základě známých souřadnic vlíčovacích bodů) automatická tvorba DMT – digitálního modelu terénu pomocí obrazové korelace (po které je ale vždy nutná následná editace vyhodnocovatelem) nebo tvorba digitálního ortofota. Samozřejmostí je práce s vektorovými daty, včetně **superimpozice vektorové kresby** do snímků ve stereoskopickém módu (tzn. možnost kresby a editace kresby přímo na prostorovém modelu).

- **ImageStation (Z/I Imaging – Intergraph)**
- **Helava – Socet Set (LH Systems – Leica)⁷**

➤ **malá digitální fotogrammetrická pracoviště**

Pro vyhodnocení stereoskopické dvojice digitálních snímků lze snadno uzpůsobit i běžný počítač pomocí tzv. sklopného stereoskopu (čočko-zrcadlový stereoskop umístěný před monitorem počítače) a vhodného software.

- **VSD – Video Stereo Digitiser (AGH Krakow, Polsko)**
- **DVP – Digital Video Plotter (Leica Geosystems)**

Snímky průsekové fotogrammetrie (např. ze semiměřických réseau a digitálních i neměřických komor) lze vyhodnotit na běžném PC s vhodným software, ovšem opět bez možnosti využít umělý stereoskopický vjem.

⁶ V ČR byly tyto stroje používány od 90. letech 20. století díky programu FARE.

⁷ Další výrobci se soustřeďují především na vývoj software pro DPW (viz. kapitola 3.6).