

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 pupil*** – tj. vodorovnou vzdálenost mezi točnou osou měřické komory a bodem O.

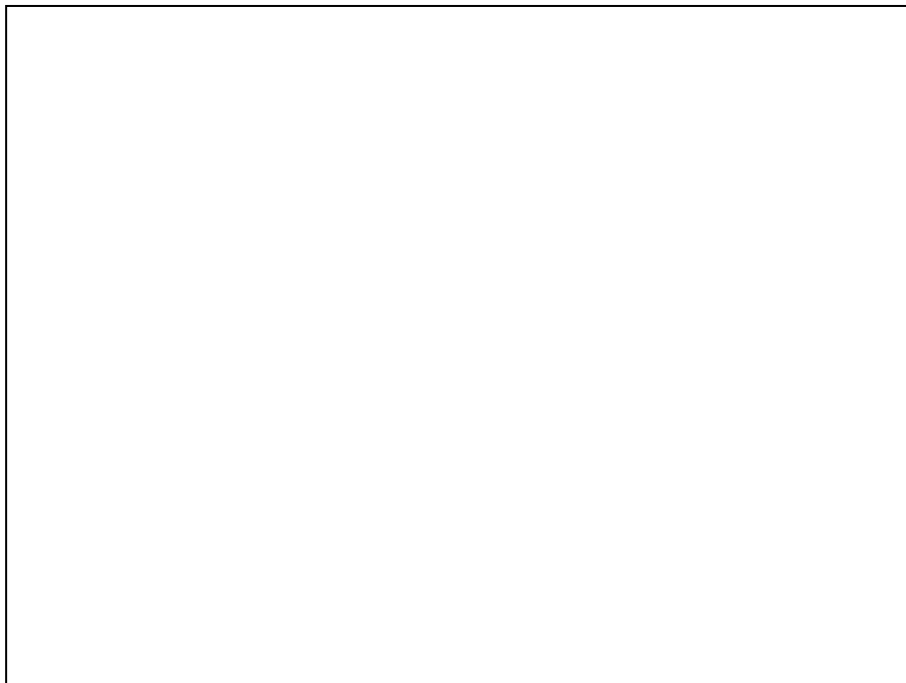


Osy záběrů mají být pro získání kvalitního stereoskopického vjemu rovnoběžné. Pokud není tato podmínka dodržena, rozlišujeme případy *konvergentní* (osy se mírně sbíhají) nebo *divergentní* (osy se mírně rozbíhají). Stereovjem se zhoršuje, je omezen jen na blízké okolí měřické značky nebo zcela zaniká.

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

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

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

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

c) ve sklopení svislé 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 $\Delta BCD \sim \Delta BH''P$.

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 vlíčovacích 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 stanviscích 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 vlíčovací);
 - 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', z' 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 nejpresnější 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