



# Kapitoly z fotogrammetrie

Ing. Jan Staněk

Střední průmyslová škola zeměměřická v Praze

2013

# Obsah

## 1 Úvod

1.1	Definice a zařazení fotogrammetrie .....	1
1.2	Dělení a využití fotogrammetrie .....	2
1.3	Historický vývoj .....	5

## 2 Základní pojmy a vztahy ve fotogrametrii

2.1	Měřický snímek, vznik a vlastnosti – fotografické základy .....	13
2.1.1	Klasický analogový fotografický snímek .....	14
2.1.2	Digitální snímek .....	23
2.2	Zobrazení objektivem a jeho vady – optické základy .....	31
2.3	Snímkové orientace a souřadnicové soustavy – geometrické základy ...	38
2.4	Transformace souřadnic ve fotogrametrii – matematické základy ...	45
2.5	Vlícovací body .....	51
2.6	Stereoskopické vidění a měření .....	54

## 3 Pozemní fotogrammetrie

3.1	Charakteristika pozemní fotogrammetrie – metody a využití .....	61
3.2	Postup prací v pozemní fotogrametrii .....	62
3.3	Komory pro pozemní fotogrametrii .....	67
3.4	Jednosnímková pozemní fotogrammetrie .....	73
3.5	Průřezová fotogrammetrie .....	76
3.6	Dvousnímková pozemní fotogrammetrie .....	78
3.7	Vyhodnocovací přístroje a systémy pro pozemní fotogrametrii .....	84

## 4 Letecká fotogrammetrie

4.1	Charakteristika letecké fotogrammetrie – metody a využití .....	89
4.2	Příprava a provedení snímkového letu .....	91
4.3	Letecké měřické komory a pomocná zařízení .....	100
4.4	Jednosnímková letecká fotogrammetrie .....	113
4.5	Dvousnímková letecká fotogrammetrie .....	116
4.6	Digitální ortofoto a tvorba DMT .....	123
4.7	Snímkové triangulace .....	127
4.8	Vyhodnocovací přístroje a systémy pro leteckou fotogrametrii .....	132

<b>Literatura</b> .....	136
-------------------------	-----

# 1. Úvod

## 1.1. Definice a zařazení fotogrammetrie

- název zavedl (r.1858) Albrecht Meydenbauer – průkopník fotogrammetrické dokumentace historických stavebních objektů (cca 16 000 snímků), (z řečtiny: *Fótos* – světlo, *Gramma* – písmeno, zápis, *Metrie* – měření), tj. měření na záznamu pořízeném pomocí světla<sup>1</sup>
- **Definice:** Fotogrammetrie je vědní obor zabývající se získáváním informací (především geometrických vztahů) z obrazových záznamů (nejčastěji měřických snímků).

*informace* → geometrické vztahy – tvar, velikost a poloha objektů zobrazených na snímcích (speciálními metodami, tj. snímkováním ve více spektrálních pásmech, lze zjišťovat též druh a stav objektů)

*obrazový záznam* → měřický snímek – fotografický snímek pořízený za speciálních podmínek měřickou komorou (lze použít též snímky semiměřické, neměřické nebo jiné obrazové záznamy, např. obrazy vzniklé skenováním)

Využívá *bezkontaktní metody měření* – objekty mohou být značně vzdálené od místa snímkování (není nutný kontakt s předmětem měření). Výhodné u obtížně přístupných nebo zdraví nebezpečných oblastí a prostor (např. kamenolomy nebo skládky chemických látek).

Výhodou je *krátká doba sběru dat* a možnost periodického opakování – doba snímkování je podstatně kratší (např. ve srovnání s geodetickým zaměřením velkého území nebo členitých objektů) a většina prací se přesouvá do kanceláře (včetně volby podrobných bodů na snímcích), *opakovaným snímkováním* a vyhodnocením lze získávat informace o změnách objektů v čase (např. při živelních pohromách). Celková *doba potřebná pro mapování* území většího než cca 5 km<sup>2</sup> je oproti geodetickému zaměření *kratší a finanční náklady jsou menší*.

Fotogrammetrie je vedle geodézie a dálkového průzkumu Země jedním z dodavatelů *geograficky lokalizovaných informací* pro GIS – geografické informační systémy (Geographic Information System).

geodézie [mm, cm]	GIS	uživatel
<b>fotogrammetrie</b> [cm, dm]		
DPZ [m, km]		
geologie meteorologie hydrologie, atd.		

(srovnání fotogrammetrie a DPZ: polohová přesnost / druhové a stavové veličiny – počet spektrálních pásem, stereoskopické záběry)

<sup>1</sup> Dříve se fotogrammetrie (průseková metoda) nazývala *Metrotopografie*.

## 1.2. Dělení a využití fotogrammetrie

### ➤ Podle polohy stanoviska

- **pozemní** (je možné přesné geodetické určení polohy nepohyblivého stanoviska)
- **letecká** (pouze přibližné určení polohy pohyblivé komory v okamžiku pořízení snímku, např. pomocí GPS)
- **družicová** (využití družicových stereosnímků s vysokým rozlišením pro tvorbu geografických a tématických map středního a malého měřítka)

### ➤ Podle počtu snímků

- **jednosnímková** (vyhodnocujeme jeden snímek, vhodné pouze pro rovinné objekty a terén – 2D, dvě souřadnice v rovině X,Y)
- **dvousnímková** - stereofotogrammetrie (vyhodnocujeme oblast překrytu dvou snímků za pomoci umělého stereoskopického vjemu – 3D, tři souřadnice v prostoru X,Y,Z)
- **vícesnímková** - průseková (pomocí prostorového protínání na dvou a více snímcích provádíme bodové vyhodnocení – 3D, tři souřadnice v prostoru X,Y,Z)

### ➤ Podle způsobu záznamu obrazu

- **klasická** (fotografické materiály s citlivou vrstvou – např. filmy)
- **digitální** (elektronické prvky reagující na světlo uspořádané do matic – např. snímače CCD)

### ➤ Podle způsobu zpracování (metody vyhodnocení dvousnímkové fot.)

- **analogové metody** (při vyhodnocení vytváříme analogii/obdobu stavu jaký byl při snímání pomocí opticko-mechanických, tj. analogových strojů)
- **analytické metody** (souřadnice měřené na snímcích převádíme transformací do geodetického systému)
- **digitální metody** (souřadnice měřené na digitálních snímcích zobrazených na monitoru počítače převádíme transformací do geodetického systému – využití principů analytických metod s digitálními snímky na počítačích)

### ➤ Podle záznamu výsledků vyhodnocení

- **grafický** (přímo na kreslicím stole připojeném k analogovému stroji vzniká originál mapy – polohopisná situace a vrstevnice)
- **číselný** (při analytickém nebo digitálním vyhodnocení registrujeme souřadnice jednotlivých bodů včetně výšek)

### ➤ Podle způsobu využití výsledků měření

- **podrobné vyhodnocení** (pro tvorbu polohopisu a výškopisu mapy – analogové, analytické nebo digitální vyhodnocení)
- **snímkové triangulace** (pro zhuštění bodového pole fotogrammetrickými metodami před podrobným fotogrammetrickým mapováním – nově určené body se použijí jako body vlíčovací)

➤ Podle **mapovacích metod** (*podrobné mapování*):

- pozemní fotogrammetrie – doplňková metoda (viz. dále)
- letecká fotogrammetrie – hlavní mapovací metoda:
  - kombinovaná metoda:** polohopis je získán jednosnímkovou leteckou fot. (vzniká fotoplán) a výškopis je doplněn geodeticky (fotomapa), vhodná pouze pro rovinnaté území,
  - univerzální metoda:** polohopis i výškopis je získán dvousnímkovou leteckou fotogrammetrií, vhodná i pro členitý terén <sup>2</sup>,
  - integrovaná metoda:** polohopis vytvořen diferenciálním překreslením snímku (na diferenciálním překreslovači) převedením středového průmětu snímku na pravoúhlý průmět mapy, po připojení dalších zařízení případně i s výškopisem, vhodná také pro zvlněný terén, (historická metoda, dnes nahrazena na stejném principu založené metodě *digitálního ortofota*)

➤ **Využití fotogrammetrie pro účely mapování**

Letecká fotogrammetrie je hlavní mapovací metodou pro mapy středních měřítek. Důvodem je velká finanční a časová úspora oproti geodetickým metodám.

- **pozemní fotogrammetrie** (doplňková mapovací metoda) – především *dvousnímková*: pro strmé svahy a skály, nanejvýš s travním porostem, není vhodná pro rovinu



- **letecká fotogrammetrie** (hlavní mapovací metoda) – *jednosnímková*: pouze pro rovinnatý terén, nezalesněný nebo zastavěný, *dvousnímková*: vhodná pro zvlněný, prostorově členitý, nezarostlý a také horský terén.

<sup>2</sup> do měřítka mapy 1: 10 000 je možné grafické vyhodnocení, pro měřítka 1: 5000 a větší číselné, tj. bodové vyhodnocení

V 50. a 60. letech 20. stol. byly vyhotoveny topografické mapy 1:25 000 a 1:10 000, které jsou nadále fotogrammetricky udržovány (aktualizace ZABAGED pomocí ortofota) – zásadní význam pro státní mapové dílo.

Rovněž vnikají tématické mapy a účelové mapy velkého měřítka 1:5000 až 1:1000 (železniční, lesnické, vodohospodářské, aj.)

➤ **Další oblasti využití:**

**stavebnictví:** dokumentace staveb, zaměření liniových staveb, mapové podklady pro projekty a rekonstrukce, měření deformací

**památková péče:** dokumentace památkově chráněných objektů, nedestruktivní průzkum

**strojírenství:** proměřování výrobků, sledování montáže velkých dělů

**těžební průmysl:** sledování povrchových dolů a lomů, inventarizace skládek

**zemědělství:** sledování využití krajiny (dříve osevní plány)

**lesnictví:** porostové mapy, sledování těžby, kalamity (polomy)

**vodní hospodářství:** modelování povodí, rozsah záplav

**ekologie:** sledování skládek odpadu a znečištění (např. vodních toků)

**urbanismus a architektura:** 3D modely měst, pohledové studie, sledování postupu výstavby

**design:** určování a modelování tvarů

**policie:** kriminalistika, dokumentace velkých dopravních nehod

**medicína a tělovýchova:** sledování a dokumentace výsledků rehabilitace (vrstevnicové plány), plastická chirurgie, zubní aplikace, pohybové studie

**vojenství:** rychlý průzkum rozsáhlých oblastí, špionáž

### 1.3. Historický vývoj

#### ➤ Vývoj vytvoření obrazu středovým promítáním

- **Abu' Ali al-Hasan** (lat. Alhazen) z Basry (965-1039) r.1032 ve své vědecké práci popsal princip temné komory (*camera obscura*) pro pozorování obrazu zatmění Slunce;
  - vytváření obrazu Slunce malým otvorem uvádí již **Aristoteles** (384/3-322/1 př.n.l.)
  - ve 13. stol. (1290) *cameru obscuru* zdokonalil františkánský mnich **Roger Bacon** (1214-1294)
- **Leonardo da Vinci** (1452-1519) začal používat dírkovou komoru (1490/1492), obkresloval středové průměty objektů zachycené na matnici pro studium zákonů perspektivy
  - komora má malou světelnost, žádnou čočku a vytváří převrácený obraz
- **Girolamo Cardano** (r.1550), **Giovanni Battista della Porta** (r.1558/9) a **Daniel Barbaro** (r.1568) navrhli komoru vybavenou spojnou čočkou
- **Hooke** (r.1679) vložil do komory zrcadlo a získal tak vzpřímený obraz, který se po zachycení na matnici snáze obkresloval
- **prof. Jozef Maxmilián Petzval**<sup>1</sup> (r.1840) stanovil rovnice pro výpočet a sestavil objektiv moderní konstrukce
- v 16. a 17. je poznatků o středovém promítání využíváno k zábavným projekcím pomocí tzv. kouzelné svítilny (*laterna magica*)

#### ➤ Vývoj zachycení obrazu

- v průběhu 18. století a na počátku století 19. bylo učiněno několik objevů o citlivosti některých solí na světlo
- francouzský fyzik **J. A. Charles** konal kolem roku 1800 pokusy se zachycováním stínových obrysů osob na papír potřený křídou smíchanou se světlocitlivými látkami
- německý lékař **Johann Heinrich Schulze /Schultz/** (1687-1744) objevil a r.1727 zveřejnil poznatky o citlivosti solí stříbra na světlo (pokusy s nádobkami naplněnými směsí prováděl již od r.1725); dodnes jsou základní složkou světlocitlivých vrstev
- bývalý francouzský důstojník **Joseph Nicéphore Niépce** (1765-1833) objevil (r.1826) citlivost ke světlu u asfaltových vrstev nanesených na kovové desce (pokusy od 1816); expozice trvala několik hodin, na neosvětlených místech se při vyvolání obrazu asfalt rozpouštěl ve směsi terpentýnu a levandulového oleje, takto vyhotovené snímky se nazývaly *heliografie*<sup>2</sup>
- **William Henry Fox Talbot** (1800-1877) jako první zveřejnil proces zachycení *negativního obrazu na chlorostříbrný papír* (25./30. 1. 1839), snímky se nazývaly *kalotypie* (nebo podle svého vynálezce *talbotypie*); první negativ údajně pořídil již v roce 1835 (tj. ještě před Daguerrem, viz. další text)

<sup>1</sup> První z moderních slovenských vědců; žil ve Vídni.

<sup>2</sup> J. N. Niépce také vynalezl také jeden z prvních velocipédů nebo spalovací motor poháněný práškem z plavuní.

- r.1840 vyhotovil i první pozitivní kopie z průsvitných negativů na papíře napuštěném včelím voskem a r.1843 dokonce zvětšeniny
- v letech 1844-45 vychází jeho kniha *The Pencil of Nature* se 24 originálními fotografiemi (150 výtisků); jde o první publikace tohoto druhu
- malíř **Louis Jacques Mandé Daguerre** (1787-1851) spolupracuje od roku 1829 s J. N. Niepcem;
  - r.1833 ale Niepce umírá a Daguerre pracuje na vynálezu fotografie sám
- r.1837/8 pořídil první **pozitivní trvalé fotografické snímky – daguerotypie**
  - působením jodových par na postříbřenou destičku vzniká ke světlu citlivý jodid stříbrný; expozice musejí být několikaminutové; vyvolání se provádí rtuťovými parami a ustálení v roztoku kuchyňské soli nebo později síranu sodného; vznikne pozitivní ale převrácený obraz
  - vynález byl 7. ledna 1839 oznámen na schůzi Akademie věd v Paříži a následně odkoupen francouzským státem
  - **19. srpna 1839** podle rozhodnutí francouzské vlády věnován veškeré světové veřejnosti (k tomuto datu počítáme vynález fotografie)
- **Abel Niepce de Saint Victor** (1805-1870), synovec J. N. Niépce, objevil r.1847 způsob, jak získat **negativ na skleněné desce** polité vaječným bílkem (albuminem) smíšeným s jodidem draselným a zcitlivěné v roztoku dusičnanu stříbrného (*albuminové desky*)
  - **niepceotypie** umožňuje tvorbu mnoha pozitivních kopií; osvit stále 5-15 minut
  - následují podobné vynálezy a vylepšené postupy
- r.1851 zveřejnil **Frederic Scott Archer** tzv. **mokrý proces**
  - roztok nitrocelulózy v éteru a alkoholu (kolodium) nahradil bílek (*kolodiové desky*)
  - tato metoda vytlačila všechny předchozí díky krátké době osvitu 2-20 s (až 90 s), přestože desky se musely připravit těsně před použitím a ještě vlhké exponovat
- **1871** zveřejnil anglický lékař **R. Leach Maddox** novou metodu na výrobu **suchých desek** s vrstvou želatiny obsahující bromid stříbrný (stejně pojivo a světlocitlivá sůl stříbra se používají dodnes)
- **1884** vyvinul **George Eastman** materiál s citlivou vrstvou na pružné podložce (svitkový film)
- od roku **1906** jsou vyráběny panchromatické desky a filmy (citlivé na celé viditelné spektrum)
- **1936** vznikl první barevný film **Kodakchrom** (diapozitiv)
- **1969** vynalezli v Bellových laboratořích (USA) **Willard Boyle** a **Georgie Smith** prvky CCD (původně jako paměťový registr pracující bez přístupu světla)
  - **1970** – sestavili první kameru
  - **1975** – dosáhli kvality dostačující pro tehdejší televizní vysílání

### ➤ Historie pořizování měřických snímků

- **M. A. Cappeler** r.1726 vytvořil mapu horského masivu Pilatus v Alpách pomocí průřezové metody (používal dvě stanoviska a místo komory hranol); vznikla nepřiliš přesná mapa malého měřítká
- **Charles Francois Beautemps-Beaupré**, významný francouzský hydrograf, zdokonalil způsob vyhotovení měřických skic pomocí Wollastonova hranolu v komoře nazývané „*camera clara*“ (princip Lambertovy ikonografie)



- r. **1791** vyhotovil mapy mořského pobřeží ostrova Vera Gruz (Van Diemenova země)
- r. **1808** vyhodnocoval terén mysu St. Cruz na podkladě obrázků získaných obkreslením obrazu na matnici camery obscury
- francouzský plukovník **Langlois** v průběhu krymské **1853-1855** války při obléhání Sevastopolu poprvé aplikoval metodu pozemní fotogrammetrie (mokrý fotografický proces)
  - **Aime Civile** začal během výzkumu Alp a Pyrenejí **1858-1868** jako první používat ve fotogrammetrii suché fotografické desky
  - **Albrecht Meydenbauer** r. **1867** poprvé úspěšně použil na německém území pozemní fotogrammetrii pro zaměření chrámu ve Freyburgu. Další historické stavby dokumentoval na celkem 16 000 snímcích.
    - zavedl rovněž název oboru **Fotogrammetrie**;<sup>3</sup> poprvé roku **1893**
  - francouzský novinář, karikaturista, aviatik, lékař a umělecký fotograf **Gaspar-Felix Tournachon** (1820-1910), zvaný **Nadar**, r. **1858** pořídil z upoutaného balónu, pro měřické účely snímky vesnice Bièvre u Paříže
    - jsou to historicky první snímky pořízené ze vzduchu (výška letu přibližně 250 m)
    - jako první také experimentoval při fotografování s umělým světlem (snímky pařížského podzemí a kanalizace)
  - **J.W. Black** a **A. King** (r.1860) pořídili fotografie Bostonu z balónu (USA)
  - vojenský důstojník **Aime Laussedat** (1819-1907) r.1861 fotografoval Paříž z balónu; využíval lepších znalostí v tvorbě objektivů; experimentoval také s použitím draků
  - **Ludwig Rahrman** (r.1891) – fotografování pomocí rakety a padáku
  - **Uljanin** (r.1900) – komora nesena pomocí draků (barometrická uzávěrka)
  - **J. Neubronne** (r.1903) – patent fotografování s pomocí holuba (používalo se ještě za 2. světové války pro špionáž)
  - **1. světová válka** způsobila rozvoj letecké fotogrammetrie pro účely špionáže
    - na počátku války byla více než ½ letadel užívána pro letecké snímkování (používaly se ruční měřické komory)
  - r. **1931** je pro arktickou fotoexpedici na vzducholodi **Graf Zeppelin** umístěna vícenásobná komora
  - **2. světová válka** způsobuje další rozvoj leteckého průzkumu
    - vznik spektrozónálních filmů pro odhalování maskovaných objektů
  - **4.10. 1957** byla vypuštěna první umělá družice Země – **Sputnik I**
  - **1962** vypuštěna první geodetická družice – **ANNA I B** (USA – NASA) určená pro budování globálních geodetických sítí (nepořizuje obrazová data)
  - do 60. let klademe i vznik nového vědního oboru: **dálkového průzkumu Země (DPZ)**
  - vznikají další projekty pro pořizování obrazových družicových dat s celosvětovým významem: **SPOT** (Francie), **LANDSAT** (USA), **KOSMOS** (SSSR – dnes Rusko)

<sup>3</sup> Dříve se používal název *Metrotopografie* označující pouze průsekovou metodu. Ještě starší je název *Ikonometrie* používaný pro vyhodnocení z průmětny obkreslených obrazů (skic).

## ➤ Vývoj metod vyhodnocení a přístrojové techniky

### - matematické základy

- malíř **Albrecht Dürer** spojil r.1525 půdorys s nárysem do prostorového zobrazení; konstruoval mechanické zařízení pro vytváření kreseb perspektivy
- matematici **Taylor** (1715) a **J. H. Lambert** (1759) popsali rekonstrukci středových průmětů a položili tak základy pro průsekovou fotogrammetrii (tzv. ikonografie); na základě středových průmětů lze vyhotovit průmět pravouhlý
- **Gaspar Monge** (1795) vypracoval vědeckou soustavu deskriptivní geometrie, kterou tajně přednášel již od roku 1768 na vojenské škole (předpokládal velký strategický význam).
  - praktické využití v inženýrství a vojenství zavedl ještě v témž století **Fréziér**
- **Sebastián Finsterwalder** (1862-1951), profesor na univerzitě v Mnichově, definoval geometrické základy fotogrammetrie

### - vývoj průsekové metody

- **1851/59** – plk. **Aimé Laussedat** (1819-1907), předseda komise pro posouzení využitelnosti fotogrammetrie, nechává pro vojenské účely zkonstruovat první **fototeodolit** (fotografická komora+dalekohled+vodorovný kruh+třínožka+stativ); konstrukce Brunner
- ⇒ **průseková fotogrammetrie** (původně nazývaná „*Metrotopografie*“)
  - 1862 bylo na vědecké konferenci v Madridu jeho zásluhou uznáno použití fotogrammetrie pro mapovací práce
- **1871** – italský **prof. ing. Ignazius Porro** konstruoval **fotogoniometr** – „snímkoměrný theodolit“, který záměrou objektivem fotografické kamery měřil na fotografické desce úhly potřebné pro vyhodnocení průsekové fotogrammetrie (dříve bylo možné pouze grafické vyhodnocení).
  - **1896** – nezávisle navrhl shodné řešení německý **prof. ing. Koppe**
  - **Enggeert** poté tuto metodu nazval *fotogrammetrie měřického stolu*
- **1889** – **Luigi Pio Paga** zveřejnil konstrukci fototeodolitu s excentrickým dalekohledem a alhidádou.
  - vývoj byl zahájen již roku 1878 pod vedením gen. Annibala Ferréra
  - následně byla ze snímků pořízených tímto přístrojem vyhotovena mapa apeninských Alp 1:25 000
- Po roce **1900** zavedl u fototeodolitu plk. **Hübl** centrický dalekohled (umístěný na komoře) a posuvný objektiv

### - rozvoj leteckých metod

- **1890** – francouzská **firma Pathé** zkonstruovala první speciální leteckou komoru (na filmový materiál)
- **1898** – ruský důstojník **R. J. Tile** se stal autorem první **vícenásobné letecké komory** (8-násobná)
  - roku **1900** nesena drakem vlečeným za parníkem při mapování povodí řeky Pripjatě
  - **1904** – **Theodor Scheimpflug** konstruuje ve Vídni obdobnou 8-násobnou komoru

- r. **1903** voják Theodor Scheimpflug zkonstruoval první vyhodnocovací přístroj pro leteckou fotogrammetrii – **překreslovač** (dále realizoval myšlenku tvorby fotoplánů nebo radiální triangulace)
- ⇒ **jednosnímková letecká fotogrammetrie**
- r. **1915** Oskar Messter z Berlína (průkopník kinematografie) sestavil první plně **automatickou leteckou komoru** (C. Fink ji nazval řadovou komorou), která umožňovala nastavit interval expozic (intervalometr) a tím i délku základny
  - v USA řadovou komoru konstruovali **J. W. Baley** a **H. Brock**
- kolem r. **1920** další rozvoj letecké fotogrammetrie – úpravy měřické komory: automatická uzávěrka a film v rolích, který umožňuje oproti jednotlivým snímkům (skleněné fotografické desky) rychle měnit materiál, vyvíjejí se pomocná zařízení (např. krabicová libela)
- **1926** ing. Aschenbrenner konstruuje první **panoramatickou komoru**
- r. **1930** firma *Zeiss* postavila automatickou leteckou 4-násobnou komoru s rozšířeným snímkovým rozsahem
  - firma *Photogrammetrie* v Mnichově postavila vícenásobnou komoru s jedním centrálním a 8 okolo umístěnými objektivy
- **1932** generál Nenonen a prof. Väisälä (Finsko) zavedli použití **horizontálních komor** a statoskopu
- r. **1936** **Smakula** v závodech *Carl Zeiss Jena* poprvé použil na optické členy antireflexní vrstvu, která snižuje ztrátu světelnosti objektivu

#### - vývoj dvousnímkové metody

- **1857** – fyzik **Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz** sestavil **zrcadlový stereoskop** s rozšířenou oční základnou (byl tak umožněn vznik dvousnímkových metod)
  - první pokusy se stereoskopií konal **Stolzo**
- r. **1901** **Dr. Carl Pulfrich** (1858-1929) spolupracovník závodů *Zeiss Jena* sestrojil **stereokomparátor** – měří za pomoci umělého stereoskopického vjemu snímkové souřadnice (poprvé měřeny) – tím je umožněno využití **stereofotogrammetrie** (zlepšuje se identifikace bodů a přesnost měření)
- ⇒ **dvousnímková pozemní fotogrammetrie – analytické vyhodnocení**
  - **1903** – uskutečnil **P. Selinger** testovací měření
- r. **1908** podle návrhu rakouského důstojníka, npor. **Eduarde von Orel** (1877-1941, původem z Moravy) zkonstruoval **Dr. C. Pulfrich** (na základě stereokomparátoru) ve firmě *Rudolf und August Rost* prototyp **Autostereografu**, který byl prakticky dořešen v letech 1909-1911 a následně vyráběn v závodech *Carl Zeiss Jena* jako **Stereoautograf** – na připojeném kreslicím stole vzniká originál polohopisu a výškopisu (vrstevnice)
- ⇒ **dvousnímková pozemní fotogrammetrie – analogové vyhodnocení**
  - o podobnou konstrukci se v témž roce pokusil por. **Thompson** z vojenské školy v Chathamu
- **1919** – **prof. Karl Reinhard Hegershorff** sestrojil pro firmu *Heyde* (Drážďany) **Autokartograf** – analogový přístroj schopný vyhodnotit rozdílně skloněné letecké snímky (využívá principu Th. Scheimpfluga z roku 1898)
- ⇒ **dvousnímková letecká fotogrammetrie – analogové vyhodnocení**
- r. **1920/21** – dostává **H. Wild** patent na **Autograf** (konstrukce Reinhard

Hugershoff )

- r. **1923** – vzniká podle návrhu **Waltera Bauersfelda** v závodech *Carl Zeiss Jena* analogový stroj s optickou projekcí – **Stereoplanigraf**
- konstrukce dalších přístrojů firmy *Zeiss*:
  - 1930 – *Multiplex* (konstrukce Gasser)
  - 1953 – *Steko 1818*
  - 1954 – *Stereoautograf 1318*
  - 1969 – *Technokart*

#### - rozvoj analytických a digitálních metod

- r. **1964** byl spoluprací závodů *O.M.I. Nistri* (Itálie) a *Bendix Corporation* (USA) zkonstruován první **analytický vyhodnocovací stroj** (patent Uki Helava, 1957)
- počátkem **70. let** s rozvojem počítačových technologií (sálové počítače) začínají být používána **registrační zařízení** (připojeno k vyhodnocovacímu stroji zaznamenává naměřené souřadnice)
  - ⇒ rozvoj **analytických metod** (také pro mapovací práce)
- **80. léta** – vstup **osobních počítačů** (PC–Personal Computer) na trh
  - ⇒ vznik **digitální fotogrammetrie** (zpracování skenovaných leteckých snímků)
    - ve stejné době byla ukončena výroba analogových strojů (používány 80 let)
- **90. léta** – na trhu se objevily první **digitální fotoaparáty**, které umožnily využití digitální technologie ve fotogrammetrii (především v průmyslu)
  - ⇒ obnovení metody **průsekové fotogrammetrie**

#### - další vývoj po r. 2000

- **digitální letecké měřické komory** využívají principu vícenásobných komor nebo pořizují souvislé obrazové pásy skenováním (nejsou středovým průmětem)
- **digitální fotogrammetrická pracoviště** (DPW) umožňují zpracování digitálních (nebo skenováním digitalizovaných) snímků analytickými metodami a tvorbu digitálního ortofota
- **digitální model terénu** (DMT) je novou formou záznamu výškopisu při počítačovém zpracování snímkové dvojice (může být využita automatická tvorba)
- **laserové skenování** je používáno pro tvorbu 3D modelů z mráčka bodů (odlišná technologie oproti fotogrammetrii, ale stejné oblasti využití)

#### ➤ Vývoj v Čechách a na Slovensku

- **prof. Karel František Edvard Kořistka** cestuje roku **1856** do Paříže, aby zde studoval nově vzniklou metodu fotogrammetrie přímo u plk. Laussedata (nazývaný „otec fotogrammetrie“)
  - r. **1862** poprvé aplikoval pozemní průsekovou fotogrammetrii; snímkoval z Hradčan a Petřína a vyhodnocením pražských věží získal polohopisný plán Prahy
  - v následující přednášce se ale vyjádřil, že metoda není z praktických důvodů použitelná, a to pro obtíže s přípravou mokřích fotografických desek v terénu
- **prof. Novotný** zaměřil roku **1891** metodu průsekové fotogrammetrie Vyšehrad

- později v letech 1913-1914 hrad Karlštejn (celkem ze šesti základů)
- **1893-1897** provedeno první zaměření Tater v měřítku 1:25 000
- **1906/1908** – první letecké fotografie v Čechách z balónu kpt. Hůlky pořídil **Jan Plischek /Plischke/**
  - snímkoval oblast dnešního Výstaviště v Praze Holešovicích
- **1912** – profesor pražské techniky **Jaroslav Pantoflíček** jako jeden z prvních určil drobné pohyby a přetvoření (deformace) stavebních konstrukcí stereofotogrammetricky
  - uveřejnil o tom vůbec první odborný článek v oficiálním orgánu Mezinárodní fotogrammetrické společnosti „Archiv für Photogrammetrie“
- **1921** – poprvé v Čechách použita stereofotogrammetrie při mapování Trutnova
- **1923-1931** proběhlo mapování skalnatého údolí Vltavy
- před **2. světovou válkou** bylo téměř celé území České republiky zmapováno leteckou (67 000 km<sup>2</sup>) a pozemní (1600 km<sup>2</sup>) fotogrammetrií
  - první snímky od r.1927, celoplošně poprvé 1936
- **od 50. let** se letecká fotogrammetrie podílí především na vzniku topografických map středních měřítek – na více než 70% území
  - využívala se univerzální a kombinovaná metoda s vyhodnocením na analogových strojích a překreslovačích
- **1957-71** mapování v měřítku 1:10 000; na 84% území fotogrammetricky
  - vznikaly i mapy tématické a účelové (velké měřítko)
- po roce **1989** byl zrušen státní monopol na letecké snímkování, byla zrušena cenzura a utajování snímků a na pole fotogrammetrie vstoupil soukromý sektor využívající zejména digitální technologie
- letecká fotogrammetrie zůstává jedním z hlavních zdrojů dat pro údržbu map středních měřítek a aktualizaci databáze **ZABAGED** prostřednictvím digitálního ortofota (v rámci státního mapového díla)
  - stává se dodavatelem geometrických i popisných dat pro **GIS**

#### ➤ Organizace oboru fotogrammetrie

- **4.6. 1910** založena **ISP – International Society for Photogrammetry** (*Mezinárodní společnost pro fotogrammetrii*)
  - vznikla podle vzoru *Rakouské společnosti pro fotogrammetrii* založené 3.5. 1907 (zásluhou rakouského geodeta českého původu prof. Eduarda Doležala, který byl také prvním presidentem ISP)
  - první kongres se konal roku **1913** ve Vídni; od té doby se kongresy pořádají každé čtyři roky
- **18.5. 1930** byla v Praze založena **Československá fotogrammetrická společnost**
  - dnes *Společnost pro fotogrammetrii a dálkový průzkum*  
[www.sfdp.upol.cz](http://www.sfdp.upol.cz)
- **1976** – ISP přejmenována na **ISPRS - International Society for Photogrammetry and Remote Sensing** (*Mezinárodní společnost pro fotogrammetrii a dálkový průzkum*)  
[www.isprs.org](http://www.isprs.org)

➤ **Učebnice fotogrammetrie**

- **1891** napsal **prof. Fr. Steiner** jednu z prvních učebnic fotogrammetrie
  - již od roku **1889** jako první v Rakousko-Uhersku přednášel fotogrammetrii na německé technice v Praze v rámci pozemního stavitelství
- učebnice **prof. Müllera** a **prof. Novotného** z roku **1904** obsahuje 85 stran o fotogrammetrii (pražská technika)
- **1936** vydala Česká matice technická první česky psanou učebnici – **prof. Pavel Potužák: Základy letecké fotogrammetrie**
- **1954** vyšla první slovenská učebnice – **Pavol Gál: Fotogrametria**
- **1975** – ing. **J. Hermany** a ing. **V. Pichlík, CSc.: Fotogrammetrie (učebnice pro 3. a 4. ročník Střední průmyslové školy zeměměřické)**
- **1986** – Doc. Ing. **J. Šmidrkal, CSc.: Fotogrammetrie (učebnice pro 3. ročník studijního oboru geodézie)**

## 2 Základní pojmy a vztahy ve fotogrammetrii

### 2.1 Měřický snímek, vznik a vlastnosti – fotografické základy

Základem pro každé využití fotogrammetrie je měřický snímek, tj. snímek, který splňuje požadavky na kvalitu, přesnost a pro který známe *prvky vnitřní a vnější orientace* – je pořízen měřickou komorou. Ideální měřický snímek je *středovým průmětem* zobrazované skutečnosti (platí, pouze pokud opomeneme vady zobrazení objektivem, tj. odchylky od ideálního středového průmětu). Takto idealizovaný středový průmět ovšem nevytváří žádný reálný objektiv (viz kapitola 2.2).

Ve fotogrammetrii nejčastěji řešíme převod středového promítání snímku na pravouhlý průmět mapy nebo plánu.<sup>1</sup>



Středové promítání (lineární perspektiva) je definováno:

- *promítací vzdáleností*, tj. vzdáleností středu promítání od průmětny (pro měřické snímky a komory tuto vzdálenost nazýváme konstanta komory)
- *polohou průmětny k ose promítání*, předpokládáme kolmou rovinu snímku k ose záběru (pro měřické snímky osa záběru prochází snímkem v hlavním bodě, poblíž jeho středu)
- *deformacemi promítání*, tj. zkreslením (patří mezi vady zobrazení objektivem, největší význam má radiální distorze)

#### ➤ Požadavky na kvalitu a přesnost snímku:

- vysoká rozlišovací schopnost (má zásadní vliv na výslednou přesnost)
- rozměrová stálost (závisí na velikosti srážky použitých podložek)
- dostatečná a vhodná citlivost ke světlu (nesmí vznikat podexponované nebo přeexponované snímky)
- dobrá reakce na různé množství světla odraženého od snímaných předmětů – tj. pružnost (světlé i tmavé plochy mají být dobře prokresleny)
- dobrá reakce na světlo různé vlnové délky (většinou v rámci viditelného záření)

<sup>1</sup> Na základě tohoto převodu se vytváří také digitální ortofoto, které vzniká ze snímků vytvořených středovým průmětem, ale samo již zobrazuje skutečnost v průmětu pravouhlém.

Snímek bývá ve většině případů výrazně menšího měřítka, než má být pořizovaný plán nebo mapa, takže je porušena geodetická zásada postupu od velkého (měřítka) k malému – tvar a velikost předmětů se při použití fotogrammetrie zvětšují. Proto jsou kladeny na měřický snímek vysoké nároky.

Měřické snímky dělíme podle způsobu záznamu obrazu na klasické fotografické snímky (analogové) a digitální snímky.

### 2.1.1 Klasický analogový fotografický snímek

Obraz vzniká **změnou chemického složení** citlivé (fotografické) vrstvy, která je způsobena energií dopadajícího záření během expozice (osvitu). Využívá se citlivosti některých halogenidů (halových solí) stříbra na světlo. Zachycený obraz nazýváme *latentní* (skrytý, není viditelný).

#### ➤ Druhy fotografických materiálů:

- **negativ** – stranově i výškově převrácený obraz na průsvitných podložkách, má opačné barevné podání (tzv. komplementární, doplňkové barvy). Vzniká při expozici ve fotografické komoře (následuje jeho vyvolání). Při zvýšeném požadavku na přesnost provádíme měření přímo na negativu.
- **pozitiv** – stranově i výškově správný obraz, má správné barevné podání. Vzniká kopírováním negativu. Pro práce běžné přesnosti vyhotovujeme *pozitivní kontaktní kopie* na film (případně na sklo) nebo kontaktní kopie a *zvětšeniny* na papír (pouze pro dokumentační účely).
- **diapozitiv** – stranově i výškově převrácený obraz, má správné barevné podání. Vzniká při expozici na přímopozitivní (inverzní) materiály. Není vhodný pro vyhotovení kopií a zvětšenin.

#### ➤ Složení fotografického materiálu:

1. **Podložka** – pevný, rozměrově stálý materiál, na němž je nanášena citlivá vrstva

a) **sklo** – nemá prakticky žádnou srážku, ale již se nepoužívá (jen výjimečně pro vědecké účely), nevýhodami jsou velká hmotnost a křehkost materiálu (obtížná manipulace), je nevhodné pro leteckou fotogrammetrii; hlavní použití skleněných podložek ⇒ negativ

b) **film** – dnes používanými filmovými materiály<sup>2</sup> jsou *polyestery*, např. PET – polyethylentereftalát – obtížně hoří a je téměř beze srážky, používá se v tloušťce 0,1-0,3 mm;

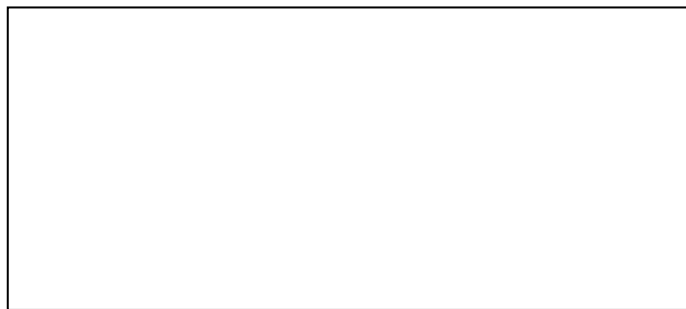
hlavní použití filmových podložek ⇒ negativ, pozitivní kontaktní kopie, diapozitiv

c) **papír** – *polokarton* – pouze pro lesklé kopie a zvětšeniny (nepravidelná srážka), *karton* – lze použít pro měření nižší přesnosti (pravidelná srážka), *zajištěný papír* (s vloženou hliníkovou folií) – používá se jako podklad pro tvorbu map (fotoplánů) překreslením snímku;

hlavní použití papírových podložek ⇒ pozitiv, kontaktní kopie nebo zvětšenina

<sup>2</sup> Dříve používané filmové materiály: *nitrocelulóza* (celuloid) – téměř beze srážky, ale snadno hoří, *acetylcelulóza* - nehoří, ale má velkou srážku, *triacetylcelulóza* – malá srážka, nehoří





2. **Citlivá vrstva (emulze)**<sup>3</sup> – skládá se z *pojiva* (lepidlo dobře přijímající vodu – želatina, arabská klovatina), *látek citlivých na světlo* (halogenidy stříbra = halonové soli stříbra, nejčastěji bromid stříbrný AgBr) a dalších přísad (aditiv): senzibilátory, barviva, stabilizátory, atd.

3. **Antihalační vrstva** je nanášena na spodní straně průsvitných podložek, kde brání zpětnému odrazu paprsků při expozici a tím i rozostření obrazu. Při vyvolání se rozpouští.

➤ **Vznik obrazu:**

a) **osvit** (expozice) – v místech dopadu světelných paprsků dochází vlivem jejich energie k rozštěpení bromidu stříbrného (na brom a stříbro) a vytvářejí se zde tzv. *zárodky vyvolání*, vzniká *latentní obraz* (není viditelný)

b) **vyvolání negativu** – provádí se bez přístupu světla (ve vývojnicích nebo vyvolávacích tancích) v lázni alkalické (zásadité) jemnozrnné *vývojky*, na osvětlených místech dochází k vylučování kovového stříbra (projevuje se černáním fotografické emulze), [5' až 10']<sup>4</sup>

c) **přerušeni** – rychle ukončí proces vyvolávání (neutralizuje vývojku) ve vodě nebo kyselém roztoku (např. kyseliny octové), takže obraz dále nečerná

d) **ustálení** – způsobuje znečitlivění fotografického materiálu ke světlu v kyselém ustalovači, rozpouští se neosvětlený bromid stříbrný, [10' až 20']<sup>5</sup>

e) **praní** – dochází k odplavení zbytků rozpuštěného bromidu stříbrného tekoucí vodou, má zásadní vliv na trvanlivost obrazu, [cca 30']

f) **sušení** – skleněné desky a filmy necháme volně vykapat ve svislé poloze, pro urychlení je možné použít sušící skříně s proudícím nezahřátým vzduchem (při zvýšení teploty vzduch hrozí vznik srážky nebo dokonce rozpuštění želatiny)

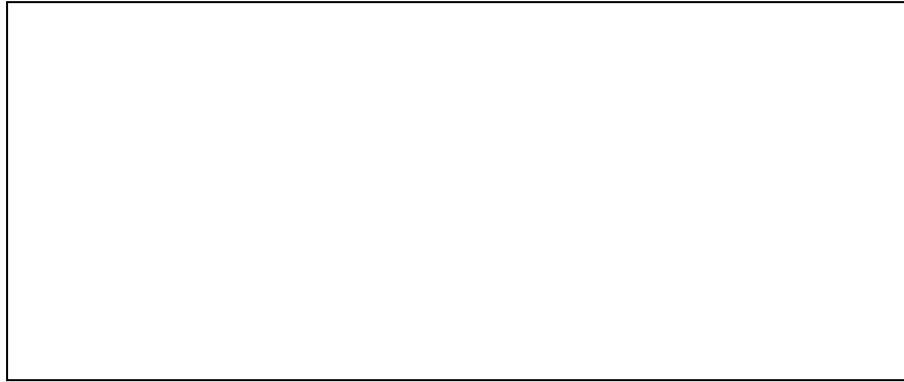
⇒ vzniká *trvalý viditelný negativní obraz*

g) **kontaktní kopírování** (zachovává rozměry a měřítko snímku) nebo **zvětšování** (rozměry a měřítko snímku se zvětšují), dochází k osvitu pozitivního materiálu (na skle, filmu nebo papíře)

<sup>3</sup> Označení *emulze* není správné, protože citlivá vrstva obsahuje krystaly solí stříbra rozptýlené v roztoku želatiny (pevná látka v kapalině, nikoli kapalina v kapalině), jedná se tedy o *suspenzi*.

<sup>4</sup> Doba vyvolání závisí na chemickém složení vývojky, na její teplotě a stáří (vyčerpání) vývojky.

<sup>5</sup> Doba ustálení viz. předchozí poznámka. Použité (vyčerpání) ustalovače obsahují značné množství stříbra – až 7g/l; odevzdávají se ve sběrnách.



- h) **vyvolání pozitivu** – provádí se při tlumeném červeném nebo tmavozeleném světle, případně ve tmě (podle typu fotografického materiálu), [pro pozitivy na papíře max. 2' až 3']
- i) **přerušení** – viz. bod c)
  - j) **ustálení** – viz. bod d)
  - k) **praní** – viz. bod e)
  - l) **sušení** – papírové kopie volně usychají na skle ve vodorovné poloze, sušičky a leštičky nelze použít pro měřické snímky, objevily by se velké srážky

⇒ vzniká **trvalý viditelný pozitivní obraz**

Proces vyvolání negativu a pozitivu je možné urychlit pomocí vyvolávacích automatů a elektrických kopírek.

➤ **Vlastnosti citlivé vrstvy:**

- a) obecná citlivost ke světlu
- b) citlivost k barvám
- c) gradace
- d) rozlišovací schopnost (jemnozrnnost)
- e) srážka

ad a) **obecná citlivost ke světlu**

Udává množství světla, které je potřebné k určitému stupni černání citlivé vrstvy.

V současné době se uvádí v mezinárodní stupnici ISO (International Standards Organization). Dříve se používaly také stupnice DIN (Deutsche Industrie-Normen, totožná s českou technickou normou ČSN), ASA (American Standards Association, totožná s ISO) nebo GOST (v bývalém SSSR). Obecně platí:

- Čím větší číslo stupnice, tím větší je citlivost materiálu.
- Čím větší citlivost, tím kratší expozice (osvit) je možné za stejných světelných podmínek volit.
- Čím větší citlivost, tím větší zrnitost částic v emulzi (zhoršuje se rozlišení).

Pro přibližný převod mezi starší stupnicí DIN (také ČSN) a současnou stupnicí ISO platí následující tabulka – výchozí hodnotou citlivosti je 21 DIN = 100 ISO.<sup>6</sup>

9 DIN = 6 ISO
15 DIN = 25 ISO
<b>21 DIN = 100 ISO</b>
24 DIN = 200 ISO
27 DIN = 400 ISO

#### ad b) citlivost k barvám

Druhy materiálů podle citlivosti k barvám:

- **černobílé snímky** – použité senzibilátory a barviva určují citlivost vrstvy k některé části spektra.
  - *nesenzibilovaný materiál* – citlivý jen k modré barvě (použití v reprografii)
  - *ortochromatický materiál* – nejcitlivější k modré, zelené a žluté; nereaguje na červenou (pro pozemní fotogrammetrii – převažují kratší vlnové délky),
  - *panchromatický materiál* – citlivý na celou část viditelného spektra (vhodný i pro leteckou fotogrammetrii – dobrá prostupnost dlouhovlnného záření atmosférou)

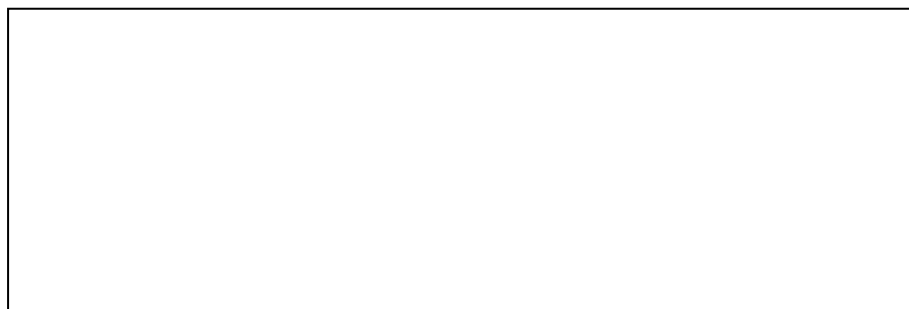
Lidské oko rozliší na černobílém snímku přibližně 16 odstínů šedi. Proto je méně vhodný pro interpretaci (čtení obsahu) snímku nebo zjišťování druhových a stavových veličin. Používá se v případech, kde je třeba určit pouze geometrické vztahy (tvar, velikost a polohu). Snímkování na černobílé materiály je levnější.

#### ➤ barevné snímky

Mají několik uměle obarvených citlivých vrstev, které reagují na jednotlivé barevné složky záření (žlutá vrstva na modré světlo, purpurová vrstva na zelené světlo a azurová vrstva na červené světlo). Barevné vrstvy zároveň působí jako filtry, takže postupně pohlcují světlo kratších vlnových délek. Za první žlutou vrstvou je ještě vložen žlutý filtr, takže modré světlo se do dalších vrstev neodstává (na toto krátkovlnné záření totiž silně reagují všechny světlocitlivé látky).

Po vyvolání je výsledný obraz u negativního materiálu v *doplňkových (komplementárních) barvách*: červená (R - red) – azurová (C - cyan), zelená (G - green) – purpurová (M - magenta), modrá (B - blue) – žlutá (Y - yellow). Červená, zelená a modrá (RGB) jsou základní barvy, azurová, purpurová a žlutá (CMY) jsou k nim doplňkové (komplementární) barvy.

<sup>6</sup> Stupnice DIN je logaritmická a stupnice ISO aritmetická. Proto zvýšením citlivosti o 3 stupně DIN získáváme dvojnásobnou citlivost ve stupnici ISO. Např. 21+3 = 24 DIN odpovídá 2 x 100 = 200 ISO.



Barevné snímky používáme v případech, kde barva přináší novou informaci, to znamená při interpretaci snímků a zjišťování druhových a stavových veličin (např. zjišťování stavu lesních porostů, geologie). V letecké fotogrammetrii dnes již pořizování barevných snímků převažuje. Důvodem je především požadavek na tvorbu barevného ortofota.

➤ **infračervené snímky**

Zaznamenávají červenou a blízkou infračervenou část spektra (reagují také na tepelné vyzařování); výsledný obraz je černobílý. Využíváme dobré prostupnosti dlouhovlnného záření atmosférou. Používají se v pozemní i letecké fotogrammetrii pro snímkování v prostředích se sníženou viditelností (např. průmyslové oblasti zasažené smogem, při přízemní mlze nebo oblačnosti), pro sledování úniků tepla nebo objektů s hrozbou samovznícení (protipožární ochrana), pro sledování stavu porostů (projeví se množství zeleni listové – chlorofylu) a v meteorologii.

➤ **spektrozónální snímky (*False colour*)**

Obraz je tvořen dvěma uměle obarvenými vrstvami (modrá a červená): panchromatickou a infračervenou. Vznikají tzv. *nepravé (falešné) barvy*, které neodpovídají barvám skutečným. Materiál původně vznikl pro účely špionáže (vyhledání maskovaných objektů) a dnes se používá především pro zjišťování stavu zelených porostů.<sup>7</sup>



<sup>7</sup> Kombinací panchromatického a infračerveného digitálního snímku je možné vytvořit barevnou syntézu ve stejných odstínech.

**Filtry** (barevné nebo šedé – neutrální) jsou planparalelní skleněné destičky, které mají zvyšovat kvalitu obrazu především černobílých snímků. Umísťují se před objektiv komory. Barevné filtry mění spektrální složení světla pronikajícího do komory, neutrální filtry snižují jeho intenzitu (prodlužují dobu osvitů). Světlo shodné barvy s barvou filtru je na snímku zdůrazněno, světlo barvy doplňkové je naopak potlačeno, protože filtrem neprochází. Při použití jakéhokoli filtru musíme úměrně prodloužit dobu osvitů (koeficient udává výrobce).

V pozemní fotogrammetrii používáme žluté a žlutozelené filtry. Černobílou fotografii tak přizpůsobíme vnímání barev lidského oka, které je nejcitlivější na oblast žlutozelené barvy (kolem 560 nm), a zvýšíme kontrast snímku (omezí se zeslabování stínů modrým zářením oblohy).

V letecké fotogrammetrii používáme oranžové filtry, takže je zvýrazněno dlouhovlnné záření, které nejlépe proniká atmosférou.

Při infračerveném snímkování používáme tmavě červené až černé filtry, takže do komory neprochází žádné krátkovlnné záření, proniká pouze světlo červené a infračervené.

ad c) **gradace** (strmost – odstupňování kontrastů, expoziční pružnost)

Určuje závislost optické hustoty (černání obrazu) na expozici. Vyjadřuje se pomocí *gradační křivky* (též senzimetrická nebo charakteristická křivka).



Snímek má v ideálním případě na množství dopadajícího světla reagovat lineárně. Přímková (lineární) část křivky je *oblastí správných (normálních) expozic*. Při kratším (nedostatečném) osvitů dochází k podexponování snímku – na křivce vymezuje *oblast podexpozice*. Při delším (nadměrném) osvitů dochází k přeexponování – na křivce vymezuje *oblast přeexpozice*. Na konci této oblasti dosahuje černání svého vrcholu a pak se křivka obrací, klesá v oblasti *solarizace*, při které se optická hustota opět zmenšuje (dlouho trvajícím osvitů jsou odbourávány zárodky vyvolání). Negativní obraz se stává inverzním a barevné

podání je shodné s pozitivem. Tohoto jevu se využívá u přímopozitivních (inverzních) materiálů, tj. diapozitivů. Křivka začíná na úrovni, která odpovídá stupni černání neosvětleného materiálu – toto zaředení snímku se nazývá *závoj* a má být minimální.

Velikost *gradace*  $\gamma$  je dána tangencí úhlu  $\alpha$ , který svírá prodloužení přímkové části přímky s osou expozice<sup>8</sup>. Podle velikosti gradačního čísla rozlišujeme tyto druhy fotografických materiálů:

- *měkký*       $\alpha < 45^\circ$        $\text{tg } \alpha < 1$ ,  
méně kontrastní, široká škála odstínů šedi, velká expoziční šíře, vhodný pro kopírování příliš kontrastních negativů, používá se v pozemní fot.
- *normální*       $\alpha = 45^\circ$        $\text{tg } \alpha = 1$ ,  
standardní využití, pro kopírování negativů s normálním kontrastem
- *tvrký*       $\alpha > 45^\circ$        $\text{tg } \alpha > 1$ ,  
výrazný kontrast, omezená škála odstínů šedi, malá expoziční šíře, vhodný pro kopírování málo kontrastních negativů nebo reprodukci černé kresby na bílém podkladu, používá se v letecké fotogrammetrii

#### ad d) **rozlišovací schopnost** (jemnozrnnost)

Závisí na velikosti zrna citlivé složky vyvolaného snímku a je udávána *počtem rozlišitelných čar na mm* (‘/mm). Rozlišovací schopnost běžných fotografických materiálů se pohybuje mezi 50 až 150 ‘/mm; s průměrnou hodnotou 100 ‘/mm.

Zjišťuje se kopírováním skleněné destičky s vyrytými vzorníky čar různé šíře a hustoty (velikost mezer je shodná se šířkou čar) na testovaný fotografický materiál – poslední skupina oddělených mezer a čar (dobře rozlišitelných) určuje rozlišovací schopnost materiálu.<sup>9</sup>



Rozlišovací schopnost snímku závisí mimo jiné na citlivosti zvoleného materiálu a na použité vývojce (snímky s vyšší citlivostí ke světlu mají hrubší zrno ve vrstvě a naopak). Protože rozlišovací schopnost zásadním způsobem ovlivňuje přesnost, se kterou je možné provádět měření na snímku (je třeba rozlišit co nejjemnější detaily), požadujeme ve fotogrammetrii vysoce jemnozrnné materiály s vysokým rozlišením (přibližně 100‘/mm) a používáme jemnozrnně pracující vývojky.<sup>10</sup>

<sup>8</sup> Vyjadřuje strmost přímkové části senzimetrické křivky pomocí směrnice této přímky.

<sup>9</sup> Kromě čárových se používají i kruhové testy.

<sup>10</sup> Výsledné rozlišení snímku závisí do značné míry na rozlišovací schopnosti objektivu, která může být i menší než rozlišovací schopnost snímku.

**ad e) srážka**

Je způsobena především mokrým procesem vyvolávání a následným sušením. Její výskyt a velikost závisí na použité podložce, ale srážet se může i citlivá vrstva. Ve fotogrammetrii rozlišujeme tyto druhy srážky snímku:

- *pravidelná* – působí ve všech směrech stejnou měrou, lze ji snadno změřit a odstranit podobnostní transformací nebo úměrným zkrácením velikosti konstanty komory při vyhodnocení <sup>11</sup>
- *diferenční* – projevuje se rozdílnou velikostí srážky ve dvou vzájemně kolmých směrech (vodorovném a svislém), odstraní se afinní transformací
- *nepravidelná* – způsobuje místní deformace, které se nedají snadno zjistit a tudíž ani zcela odstranit, proto by neměla pokud možno nastat

Vliv srážek můžeme omezit také tak, že pro měření používáme buď přímo originální negativ (případně diapozitiv) nebo jeho kontaktní kopii na film nebo skleněnou desku.

Kopie a zvětšeniny na papír používáme jen pro dokumentační účely, interpretaci (čtení) obsahu snímku nebo dříve také při překreslování snímku na papír zajištěný hliníkovou folií.

➤ **Rozměry fotografických materiálů**

- a) *pro pozemní fotogrammetrii*: listový film nebo skleněné fotografické desky obdélníkového formátu založené ve světlotěsných kazetách, pořizují se jednotlivé snímky, výjimečně lze snímkovat i na filmové pásy (svitkový film)



- standardní rozměry snímku jsou: **13x18 cm** a někdy se používá též 9x12 cm

Kinofilm (políčko snímku 24x36 mm) se používá jen pro práce nižší přesnosti a na krátké vzdálenosti

<sup>11</sup> Srážku snímku zjišťujeme a odstraníme proměřením rámových značek a transformací snímku na jejich známou polohu – tento postup se používá především u snímků digitalizovaných skenováním.

- b) *pro leteckou fotogrammetrii*: filmový pás v rolích se čtvercovým formátem snímků



- standardní rozměry snímku jsou:
  - 18x18 cm (šířka pásu 20 cm),
  - 23x23 cm**, tj. 9"x9" (šířka pásu 25 cm),
  - 30x30 cm (šířka pásu 32 cm)

Délka filmového pásu může být: 7,5, 15, 30, 60 nebo 120 m. Na poslední lze pořídit až 480 snímků.

Snímky na skleněné desky se v letecké fotogrammetrii pořizují jen zcela výjimečně, pro vědecké účely s vysokými požadavky na přesnost.

#### ➤ Přehled použití různých druhů fotografických materiálů

	<i>materiál</i>	<i>citlivost</i>	<i>expoziční</i>	<i>gradace</i>	$\lambda$	<i>filtr</i>	<i>formát</i>
<b>pozemní fot.</b>	ortochrom.	6 – 80 ISO	dlouhá	$\gamma < 1$	krátké	žluto-zelený	jednotlivé s.
<b>letecká fot.</b>	panchrom.	25 – 600 ISO	krátká	$\gamma > 1$	dlouhé	oranžový	filmový pás



### 2.1.2 Digitální snímek

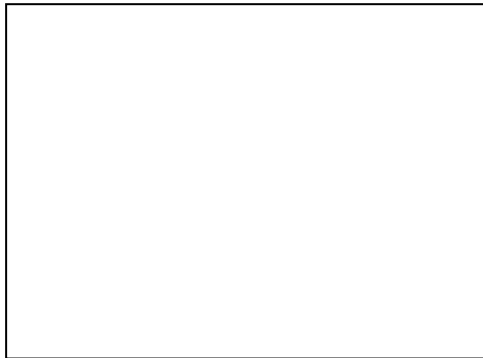
#### ➤ Historický přehled

- 1950 – v návaznosti na rozvoj elektroniky vzniká *teorie digitálního obrazu*, její praktické využití však bylo znemožněno nedostatečnou kapacitou a rychlostí tehdejších počítačů.
- 1969 – vynález prvků CCD v Bellových laboratořích (USA)
- 1970 – sestavena první digitální kamera
- 70. léta – po prvních kosmických letech přichází rozvoj digitálních technologií (vojenské družice a DPZ – mechanické skenery)
- 80. léta – vstup osobních počítačů (PC – Personal Computer) na trh, způsobuje další rozšíření digitální technologie
- 90. léta – na trhu se objevily první digitální fotoaparáty
- po r. 2000 – masové rozšíření digitální fotografie a postupné převládání i v oblasti fotogrammetrie

#### ➤ Definice a vlastnosti digitálního obrazu

Digitální snímek je obrazová informace převedená do číslicové formy.

Dopadající záření (absorbovaná energie) mění elektrické vlastnosti čidla (detektoru) – např. elektrický náboj (Q), odpor (R) nebo vodivost (G).



#### ➤ Výhody:

- při expozici v komoře vzniká primární digitální obraz – získáváme přímo digitální data
- možnost okamžitého zhodnocení kvality snímku
- vysoká citlivost CCD prvků ke světlu umožňuje velmi krátké expozice (až 1/8000 s)
- lepší radiometrické rozlišení snímku (větší barevná hloubka)
- stálost rozměru obrazu, jeho plnohodnotné kopírování a archivace
- nižší provozní náklady
- ekologická nezávadnost

➤ **Nevýhody:**

- vzniká velký objem dat
- problém s výrobou velkých přesně uspořádaných matic čidel (senzorů)<sup>12</sup>
- velká spotřeba elektrické energie prvků CCD

➤ **Základní pojmy**

- *pixel* (picture element), obrazový bod – základní a nejmenší jednotka digitálního obrazu; má určitou číselnou hodnotu (která vyjadřuje jeho barvu) a souřadnice (číslo řádku a sloupce v matici; číslováno od nuly s počátkem v levém horním rohu)
- *obrazová funkce* – udává vztah mezi souřadnicemi pixelu a jeho číselnou hodnotou; pro každý pixel vyhledá podle polohy v obraze jeho barvu; je to funkce nespojitá (diskrétní)
- *kódování obrazu* – způsob zápisu digitální obrazové informace; podle počtu bitů potřebných na vyjádření barvy jednoho pixelu rozlišujeme 1-bitové, 8-bitové a 24-bitové kódování obrazu (tato tři jsou nejpoužívanější); zvolné kódování má zásadní vliv na celkovou velikost obrazového souboru<sup>13</sup>
- *barevná hloubka* – udává maximální počet barev v obraze, tj. maximální počet různých číselných hodnot vyjádřených pomocí určitého počtu bitů; závisí na zvoleném kódování a barevném systému<sup>14</sup>
- *barevný systém RGB* – pro vyjádření každé ze tří základních barev (R-red, červená, G-green, zelená, B-blue, modrá) je použito 8-bitové kódování, barva jednoho pixelu je tedy zapsána celkem 24 bity; získáváme tzv. pravé barvy (True Colour)<sup>15</sup>; systém RGB se nejvíce používá v digitální fotografii a pro zobrazování na počítačích<sup>16</sup>
- *vícépásmový obraz* (multispektrální) – vzniká, pokud pořizujeme obrazové záznamy ve více spektrálních pásmech, také mimo viditelné záření (především v oblasti záření dlouhovlnného: infračervené a mikrovlnné)
- *rozlišení digitálního obrazu* – nejčastěji se uvádí v *DPI* (Dots per Inch), počet obrazových bodů (pixelů) na délku jednoho palce (1" = 25,4 mm); u skenerů se rozlišení udává také velikostí jednoho čidla v řádce v  $\mu\text{m}$ ; pro obrazové záznamy DPZ (dálkového průzkumu Země) se uvádí velikost jednoho pixelu ve skutečnosti (např. 1 pixel odpovídá na zemském povrchu ploše 10x10 m)

<sup>12</sup> Uspořádání jednotlivých čidel (detektorů) do řádek a sloupců (tj. do matice) nazýváme snímač (senzor) nebo také čip. Stejně uspořádání do matice potom mají i pixely pořízeného digitálního obrazu.

<sup>13</sup> Pokud vynásobíme počet všech pixelů v obraze počtem bitů potřebných pro vyjádření barvy jednoho pixelu, získáváme velikost nekomprimovaného obrazového souboru.

<sup>14</sup> Zvolnému kódování odpovídá barevná hloubka obrazu: 1 bit → max.2 barvy, 8 bitů → max. 256 barev, 24 bitů → více než 16 milionů barev (16 777 216).

<sup>15</sup> V DPZ se používá v rámci viditelné části spektra snímání ve třech samostatných pásmech (R,G,B) a barevný obraz vzniká jako syntéza těchto pásem.

<sup>16</sup> Dalším barevným systémem je např. CMYK; používá se ve čtyřbarvotisku (barvy C-cyan, azurová, M-magenta, purpurová a Y-yellow, žlutá jsou doplňkové k barvám základním a K-black slouží pro tisk sytější černé barvy); barevný gamut (rozsah všech barevných odstínů, které lze v systému vyjádřit) je v CMYK menší než v RGB.

### ➤ **Obrazové formáty**

Obrazových formátů (tj. datových formátů uložení obrazových rastrových dat) je velké množství. Běžně používaných je ale jen několik:<sup>17</sup>

- BMP – *Windows Bitmap*
- PNG – *Portable Network Graphic*
- GIF – *Graphics Interchange Format*
- JPEG (JPG) – *Joint Photographic Experts Group*
- TIFF – *Tagged Image File Format*

### ➤ **Komprese (komprimace) obrazových dat**

- *bez komprese* – není použit žádný kompresní algoritmus, objem dat zůstává stejný (odpovídá počtu pixelů v obraze a použitému kódování)
- *neztrátová (bezztrátová) komprese* – zmenšením objemu dat se z obrazu neztrácí žádná informace; po dekompresi dostáváme naprosto stejná data
- *ztrátová komprese* – při zmenšení objemu dat dochází ke ztrátě informace (např. zmenšení počtu barev); po dekompresi v obraze zůstávají neodstranitelné změny

**Kompresní poměr** je poměr objemu dat komprimovaného a nekomprimovaného obrazového souboru – udává míru zmenšení množství dat.<sup>18</sup>

formát (přípona souboru)	kódování (standardní nastavení)	barevná hloubka (max. počet barev)	komprese
BMP	24 bitů	max. 16 777 216	bez komprese
PNG	24 bitů	max. 16 777 216	bezztrátová
GIF	8 bitů	max. 256	bezztrátová
JPEG	24 bitů	max. 16 777 216	ztrátová
TIFF	všechny možnosti	viz. kódování	všechny možnosti

Formát **BMP** přestává být používaný. Objemy dat bez komprese, při zachování plné barevnosti totiž mohou být obrovské. Formát **PNG** umožňuje ukládat plně barevné obrazy, ale častěji se používá s menším počtem barev, kdy jeho neztrátová komprese dává nejlepší výsledky. Formát **GIF** se používá pro obrazy s omezenou barevností nebo pro černobílé obrazy (max. 256 barev nebo stupňů šedi). Formát **JPEG (JPG)** je nejrozšířenější pro ukládání fotografických snímků; umožňuje plnou barevnost a poměrně malý datový objem. Vzhledem ke ztrátové kompresi ale není vhodný pro uložení čárové kresby (a písma), obrazy s prudkými barevnými přechody (barevnými hranami) nebo velké obrazy s malým počtem barev. Formát **TIFF** poskytuje velké množství voleb (počet barev, kompresní algoritmus), takže jeho správné použití závisí na vhodném nastavení. Využívá se pro přenos dat mezi různými softwary.

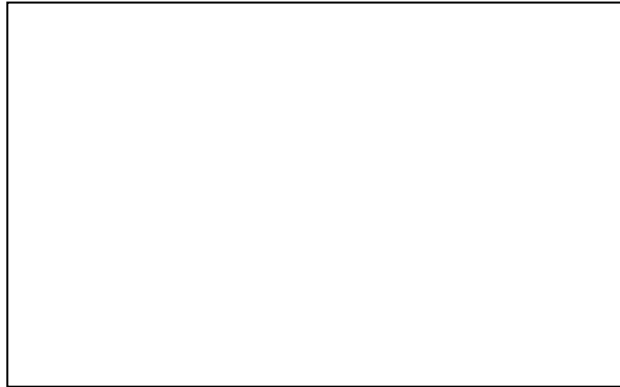
<sup>17</sup> Pro zjednodušení uvádíme označení obrazového formátu shodné s koncovkou (příponou) obrazového datového souboru.

<sup>18</sup> Pro některé formáty lze ve specializovaných softwarech velikost kompresního poměru nastavit.

### ➤ Vznik digitálního obrazu

Převod obrazové informace do číslicové formy nazýváme *digitalizace obrazu*. Využívá se procesu tzv. *vzorkování*, kdy jsou ve zvolené periodě odečtu (vzorkovacím kmitočtu) měřeny hodnoty analogového signálu pomocí A/D převodníku (Analog To Digital).<sup>19</sup>

V případě digitalizace obrazu je odečítána intenzita záření dopadajícího na čidlo a perioda odečtu je nahrazena rozlišením snímku (množství naměřených hodnot je dáno počtem všech čidel ve snímači – senzoru).



vstup: analogový signál ⇒ vzorkování (A/D převodník) ⇒ digitální výstup

### ➤ Čidla (detektory)

Oproti klasické fotografii jsou záznam a uložení obrazu dva oddělené procesy. Všechna zde uvedená čidla patří mezi křemíkové fotodiody:

- **CCD** prvky (Charge Coupled Device – “zařízení se sdruženými náboji”) jsou polovodičové křemíkové prvky, reagující na záření vlnových délek 200 až 1100 nm změnou elektrického odporu. Jejich citlivost k barvám (tzn. k různým vlnovým délkám) musí být upravena pomocí filtrů tak, aby reagovali pouze na oblast viditelného spektra (380 – 720 nm). Při expozici na čidlech vzniká elektrický náboj, který je následně přenesen do registru a v podobě analogového signálu zesílen, digitalizován a uložen.<sup>20</sup>
- **CMOS** (Complementary Metal Oxide Semiconductor) pracuje na bázi tranzistoru; oproti CCD má výrazně nižší spotřebu elektrické energie (1%), je menší a výroba levnější (o 80%), má ale nižší a nestejnou citlivost (obecnou i k barvám).<sup>21</sup>
- **fotočlánek** – je polovodič jako CCD, ale mnohem větší (nevytváří matice prvků); používá se v bubnových (laboratorních) a družicových skenerech a také pro výrobu elektrické energie v solárních panelech.

<sup>19</sup> Podobný proces vzorkování se používá při digitalizaci nejrůznějších analogových signálů (např. zvukových).

<sup>20</sup> Předávání sdružených nábojů mezi čidly až do registru je využíváno u čipů s progresivním skenem.

<sup>21</sup> U pasivních CMOS je dalším problémem vysoký šum – používají se v levnějších fotoaparátech. U aktivních CMOS je ke každému čidlu připojen obvod redukující šum – dosahují vysoké kvality obrazu.

➤ **srovnání** klasického analogového a digitálního fotografického snímku:

- Jestliže uvažujeme fotografický materiál s průměrným rozlišením 100'/mm a na zobrazení jedné rozlišitelné čáry v digitálním obraze je třeba dvou sousedních pixelů (čára a mezera), potom velikost takového pixelu vypočteme  $1 \text{ mm} / 2 \cdot 100 = 0,005 \text{ mm} = 5 \mu\text{m}$ . Přitom běžná velikost prvků CCD se pohybuje v rozmezí 3-10  $\mu\text{m}$ .
- Zásadním problémem je přesné sestavení velkých matic prvků CCD (uspořádání do řádek a sloupců a jejich správná orientace)<sup>22</sup> nebo současné odečtení a rychlé uložení velkého množství pořízených dat. Extrémně velké matice prvků CCD zatím není technologicky možné sestavit.
- Jestliže použijeme skenování analogového snímku s nejvyšším rozlišením (tzv. na zrno, 1 prvek CCD = 3  $\mu\text{m}$ ), dostáváme výpočtem hodnotu rozlišení  $25,4 \text{ mm} / 0,003 \text{ mm} = 8460 \text{ DPI}$ . Takto vysoká rozlišení se ale pro skenování snímků nepoužívají – vznikaly by příliš velké datové objemy.

*Příklad:* Pro letecký snímek formátu 23x23 cm vznikne při skenování s velikostí jednoho prvku CCD 10  $\mu\text{m}$  (tzn. 2540 DPI) 529 milionů pixelů, a to při 8bitovém kódování u černobílého obrazu (256 stupňů šedi) představuje 500 MB obrazových dat bez komprese. Pokud bychom použili skenování na zrno (8460 DPI) vzniklo by 5600 MB dat – nepoužívá se.

Podle zvoleného zařízení a způsobu jeho použití rozlišujeme digitalizaci primární a sekundární:

➤ **primární** (prvotní) **digitalizace**

Výhodou je vznik přímo digitálního obrazu při expozici v komoře. Používají se fotogrammetrické digitální komory: měřické, semiměřické a neměřické.

V *pozemní fotogrammetrii* je možné u digitálních *měřických komor*, v případě že se stanovisko ani objekty nepohybují, použít snímání obrazu pohybující se řádkou nebo maticí prvků CCD (tzv. Macro-scanning). Výsledná velikost snímku může být až 11.000x15.000 pixelů (165 Mp). Druhou možností je použití velkých přesně uspořádaných čipů (matic prvků CCD) o rozměrech až 7.168x4.096 prvků (29 Mp). Pro práce nižší přesnosti a na kratší vzdálenosti je možné použít kvalitní profesionální digitální kamery (digitální zrcadlovky) upravené pro měřické účely (tj. *semiměřické komory*) nebo i bez dalších úprav (*komory neměřické*).

V *letecké fotogrammetrii* využíváme u digitálních leteckých komor principu *vícenásobné komory*, a tak dosáhneme rozměru digitálního snímku až 17.310x11.310 pixelů (196 Mp) nebo snímání souvislého obrazového pásu *řádkou prvků CCD* (délky až 12.000 pix).

<sup>22</sup> U měřických snímků požadujeme vnitřní přesnost v poloze bodu cca 1  $\mu\text{m}$ . Se stejnou přesností provádíme i měření snímkových souřadnic.

V *dálkovém průzkumu Země (DPZ)* se pro sběr přímo digitálních obrazových dat používají mechanické a elektronické *obrazové skenující radiometry* (skenery).

➤ **sekundární (druhotná) digitalizace**

Provádí se *skenování* (postupné snímání) analogové předlohy.

➤ Předlohy pro skenování:

- **šedotónové** – pro digitalizaci postačuje rozklad na 256 stupňů šedi,

**barevné** – provádí se rozklad barevného obrazu do tří základních barev systému RGB

- **průsvitné** (transparentní) – čidlo zaznamená *světlo prošlé* negativem nebo diapozitivem na průsvitných podložkách,

**neprůsvitné** – čidlo zaznamená *světlo odražené* od pozitivu na neprůsvitné podložce,

U sekundárně digitalizovaných (skenovaných) snímků je třeba počítat s vlivem srážky, která je způsobena procesem vyvolávání analogového snímku (namáčení a sušení). *Oprava vlivu srážky* se provádí transformací na správnou polohu rámových značek, která je dána jejich snímkovými souřadnicemi uvedenými výrobcem komory v kalibračním protokolu. U semiměřických réseau komor se ke stejnému účelu používá síť křížků zobrazených v celé ploše snímku.

➤ Skenery:

- **běžné** – rozlišení cca 1200 - 4800 DPI, tj. hardwarové rozlišení, které uvádí skutečně snímané body. Výrobci často uvádějí také vyšší softwarové rozlišení, které ale nepřináší žádná nová data (další pixely jsou dopočítávány dělením skutečně snímaných bodů pomocí interpolace). Maximální formáty předloh jsou A4 až A3. Barevná hloubka při snímání může být až 40 bitů a snižuje se při uložení obrazu do zvoleného formátu datového souboru.

Přestože rozlišení těchto skenerů je dostatečné, jsou *nevhodné pro použití ve fotogrammetrii*. Nemají totiž požadovanou přesnost uspořádání a orientace čidel v řádce, ani přesnost pohybu čidel pod předlohou. Nemohou zajistit zachování vnitřní přesnosti měřických snímků.

- **pevné laboratorní** – rozlišení se pohybuje v rozmezí 1000-2000 DPI (výjimečně až 8500 DPI). Umožňují snímat předlohy standardního formátu leteckého snímku 23x23 cm na průsvitných podložkách.

Základní charakteristikou skenerů určených pro digitalizaci měřických snímků je *vyšoká geometrická přesnost* uspořádání čidel a přesnost pohybu předlohy nad snímačem. Výrobky splňující značné požadavky na přesnost se vyznačují vysokou pořizovací cenou (statisíce až miliony korun). Do této skupiny patří také fotogrammetrické skenery:

- Vlastnosti fotogrammetrických skenerů (dle údajů uváděných výrobcí):
  - *rozlišení* (velikost CCD): 3, 4, 5, 7, 10, 12-15  $\mu\text{m}$ , umožněna je volba nižšího rozlišení v násobcích velikosti CCD (např. pro CCD velikosti 7  $\mu\text{m}$  je možné volit také rozlišení 14, 21, 28, 56, 112 a 224  $\mu\text{m}$ )
  - *geometrická přesnost*: požadovaná přesnost pro uspořádání čidel a pohyb předlohy nad snímačem je 1-2  $\mu\text{m}$
  - *radiometrické rozlišení* (barevná hloubka): 8, 10, 12 až 48 bitů, volitelná pro snímání (výsledná barevná hloubka snímku závisí na formátu uložení datového souboru)
  - *maximální velikost předlohy*: největší možné rozměry (např. 260x260, 250x275, 330x440 mm), vždy je umožněno skenovat alespoň standardní formát leteckého měřického snímku 230x230 mm, buď jednotlivé snímky, nebo i z nerozřezané role filmu <sup>23</sup>
  - *osvit*: stabilním světelným zdrojem, který nemění svoje charakteristiky (např. halogenová nebo xenonová výbojka) <sup>24</sup>
  - *systém snímání barevné předlohy*: používá se technologie se třemi průchody předlohy a třemi různými barevnými filtry (RGB) nebo se třemi senzory s předsazenými filtry (RGB) a jedním průchodem předlohy (viz. další text)
  - *ovládací programy*: mohou být instalovány na platformách UNIX i Windows
  - *hardware*: výkonný osobní počítač (PC) nebo pracovní stanice s úložištěm pro velké objemy dat (pásková jednotka, CD/DVD-RW nebo externí disky)
  - *rychlost skenování* – závisí na zvoleném rozlišení a barevné hloubce (pro jeden barevný letecký snímek je doba skenování přibližně 7 minut)
- Volba rozlišení pro skenování měřických snímků:

$$DPI = k \cdot \frac{25,4}{\Delta x / m_s} = \frac{k \cdot m_s \cdot 25,4}{\Delta x},$$

kde  $m_s$  je měřítkové číslo snímku,  $\Delta x$  požadovaná přesnost v  $mm$ ,  $k$  volitelná konstanta zabezpečující požadovanou přesnost (volíme v rozmezí 2-3), **25,4** je délka palce v  $mm$ .<sup>25</sup>

<sup>23</sup> Většina zařízení nabízí automatický posun filmu ve skeneru a ukládání nasnímaných obrazů do samostatných souborů. Celá role filmu tak může být skenována plně automaticky.

<sup>24</sup> Po stanoveném počtu hodin provozu je třeba světelný zdroj vyměnit, aby byly zachovány stále stejné podmínky osvětlení.

<sup>25</sup> Výpočet převádí požadovanou přesnost do měřítka snímku. Tato hodnota odpovídá velikosti jednoho pixelu na digitalizovaném snímku, kterou je dělena délka jednoho palce (viz. také definice DPI). Výsledek je násoben konstantou, která zdvojnásobí nebo ztrojnásobí rozlišení požadované pro skenování.

### ➤ Tvorba barevného obrazu

Všechny tři uvedené postupy vytvářejí barevné obrazy v systému RGB. Jejich úkolem je získat digitální výstup pro tři základní barvy: červenou, zelenou a modrou:

- *tři průchody* (three pass) – předloha je snímána třikrát, pokaždé s jiným předřazeným barevným filtrem (RGB), pomocí jednoho senzoru; používá se ve skenerech; výhodou je jednoduchá konstrukce zařízení a kvalitní barevné podání; naopak nevýhodou velká časová prodleva
- *tři senzory* – světlo se rozkládá do barevného spektra (hranolem nebo mřížkou), ze kterého se třemi filtry vymezí a třemi senzory zaznamenávají základní barvy (RGB); používá se v profesionálních komorách, kvalitních videokamerách a skenerech
- *jedna expozice* (one shot) – barevné filtry jsou nanášeny přímo na čidlech uspořádaných do řádek a sloupců v senzoru (čipu), sousední čidla tvoří čtveřici s barvami RGBG<sup>26</sup> – toto uspořádání se nazývá Bayerova mřížka nebo filtr<sup>27</sup>; každá čtveřice čidel dává výstupní barevný signál pro jeden pixel; výsledný počet pixelů je v každé řádce a v každém sloupci o jeden menší; plně barevný obraz vzniká během jedné expozice; používá se u většiny digitálních fotoaparátů.



Pro pořizování digitálních obrazových dat bylo vyvinuto několik dalších technologií, které ovšem zatím nenašly širšího uplatnění. Jsou to například:

- *FujiFilm Super CCD* – čidla ve tvaru osmihranu s diagonálním uspořádáním; lidské oko méně vnímá linie úhlopříčné než horizontální a vertikální, které mohou působit rušivě
- *Foveon X3 / FujiFilm Organic CMOS* – tři světlopropustná křemíková čidla umístěná nad sebou využívají pro oddělení barevných složek pohltivosti světla vrstvou křemíku o určité tloušťce nebo organických barviv (princip barevného filmu v digitální fotografii)

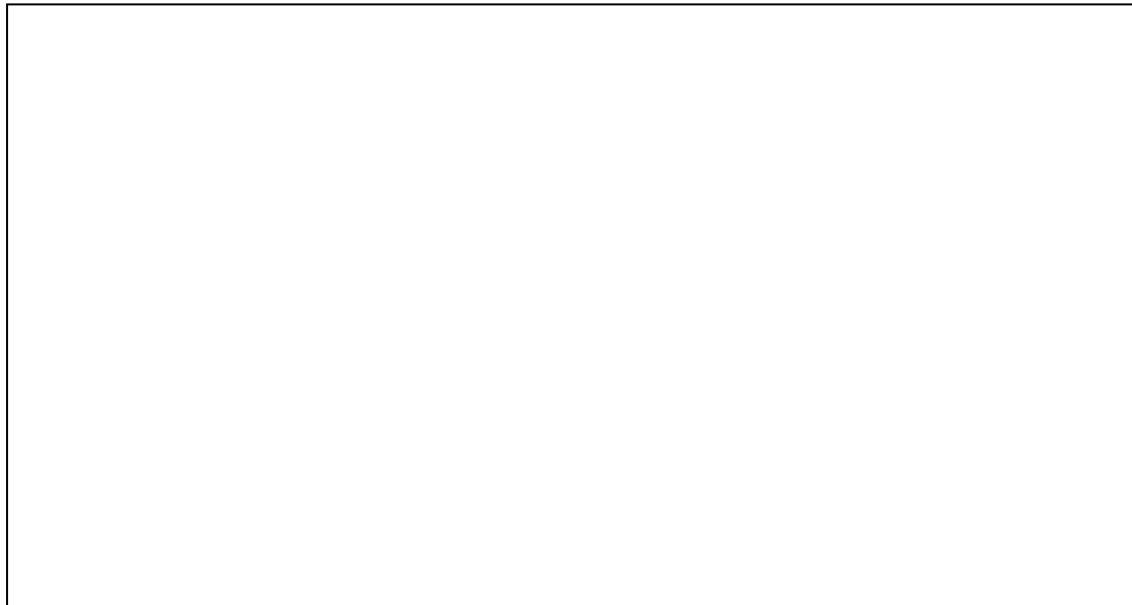
<sup>26</sup> Zelená barva se opakuje dvakrát a její výstupní signál (G) se proto musí dělit dvěma. Důvodem pro toto řešení je zvýšená citlivost lidského oka na žlutozelenou barvu.

<sup>27</sup> Podle svého vynálezce Bryce E. Bayera z firmy Kodak.



## 2.2. Zobrazení objektivem a jeho vady – optické základy

Pro případ *fyzikálně idealizovaného objektivu* je fotografický snímek středovým průmětem zobrazeného předmětu.



F – ohnisko;                                      f – ohnisková vzdálenost;  
O – střed vstupní pupily;                  O' – střed výstupní pupily;  
r – velikost předmětu;                    r' – velikost obrazu předmětu;  
a – vzdálenost předmětu před objektivem;  
b – vzdálenost obrazu předmětu za objektivem (uvnitř komory);

*Vstupní pupila* je obraz clony v předmětovém prostoru.

*Výstupní pupila* je obraz clony v obrazovém prostoru.

Pro ideální objektiv platí *čočková rovnice*:  $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$

Pro *měřítko snímku* platí:  $1 : m_s = \frac{r'}{r} = \frac{b}{a}$ ; a pro měřítkové číslo:  $m_s = \frac{r}{r'} = \frac{a}{b}$

Použitím skutečného objektivu dochází k porušení ideálního středového promítání. Tyto odchylky nazýváme vady zobrazení objektivu (aberrace).

### ➤ Vady objektivu

Dělí se do tří skupin podle vlivu na výsledný obraz – mají vliv na: kvalitu snímku (celý snímek), ostrost snímku (zobrazení bodu) a zkreslení snímku (zobrazení předmětu).

## 1. Kvalita snímku

- **úbytek jasnosti** – je způsoben pohlcováním světla při průchodu sklem čoček objektivu a odrazy na jejich ploše. Zvětšuje se směrem k okrajům snímku. Projevuje se zvláště u širokoúhlých objektivů. Nežádoucím odrazům světla od přední plochy první čočky i vnitřním odrazům uvnitř objektivu zamezuje **antireflexní (protiodrazová) vrstva**<sup>1</sup> – významně zlepšuje světelnost objektivu.

K dalšímu úbytku jasnosti dochází vlivem konstrukce objektivu nazývané **vignetování [viňetování]**, při které se průměry čoček směrem do komory zmenšují nebo jsou vsazovány do objímek (tj. při sestavování objektivu se vychází z nejmenšího průměru čočky). Docílí se zmírnění vlivu některých vad.

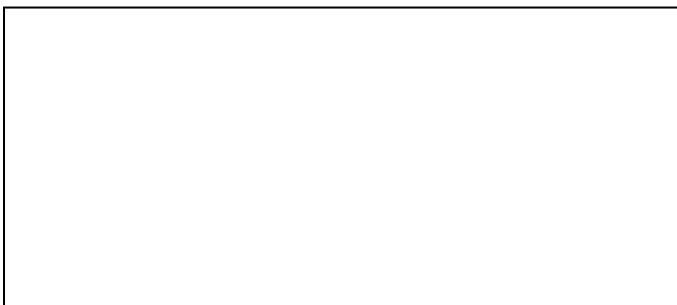


Na výrobu čoček kvalitních objektivů se pro dosažení vysoké světelnosti používá *optické sklo* speciálního složení s vysokou propustností záření, jehož výroba je technologicky náročná a tudíž i finančně nákladná.

## 2. Ostrost snímku

### a) vada kulová (sférická)

- paprsky dopadající na čočku rovnoběžně s optickou osou a více od ní vzdálené se lámou silněji než paprsky blíže optické osy, neprotínají se v jednom bodě; bod se nezobrazí jako bod, ale vznikají malé rozptylné kroužky

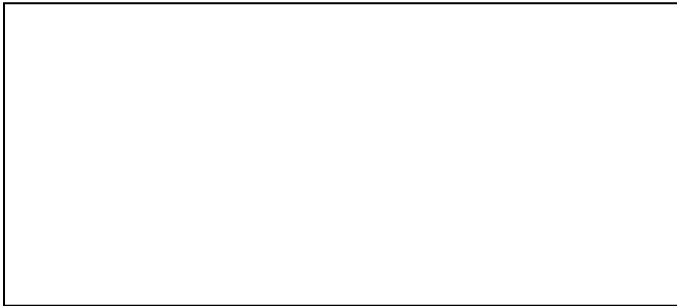


Lze zmírnit soustavou čoček **aplanát** (kombinace spojky a rozptylky).

<sup>1</sup> Nejčastěji se používá fluorid hořečnatý napařený na plochu čočky ve vakuu. Vrstva je citlivá na poškrábání a vlhkost.

b) **vada barevná** (chromatická)

- čočka rozkládá paprsky rovnoběžné s optickou osou do barevného spektra, kratší vlnové délky (modrá) se lámou více než záření dlouhovlnné (červená); místo bodu vznikají zbarvené kroužky, na hranách barevně orámovaný obraz



Objektiv se zmírněným vlivem této vady se nazývá **achromát** (kombinace spojky s rozptylkou a použití optických skel s různými indexy lomu – korunové a flintové sklo).

c) **vada koma** (asférická)

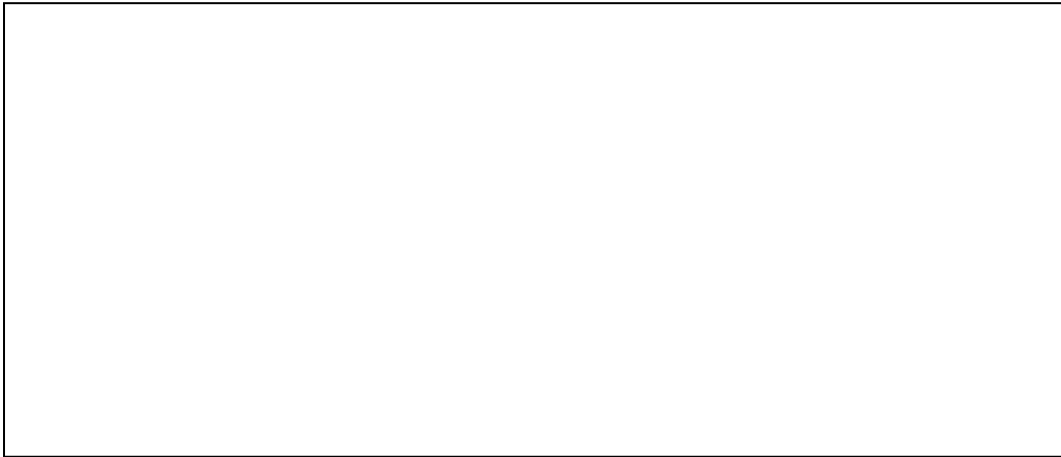
- šikmo dopadající paprsky se neprotnou v bodě, ale vytvoří obraz vějíře – koma znamená v řeckém jazyce vějíř; bod se zobrazí jako mimoběžné úsečky



Odstraní se společně s astigmatismem při výrobě (zasazením čoček do objímek).

d) **astigmatismus** (nebodovost)

- svazek šikmo dopadajících paprsků zobrazí místo bodu dvě mimoběžné, kolmé čárky; ohniska vodorovných a svislých linií jsou různá, takže nelze současně zaostřit na vodorovné i svislé linie obrazu, zaostřením mezi obě ohniska se bod zobrazí jako neostrý křížek



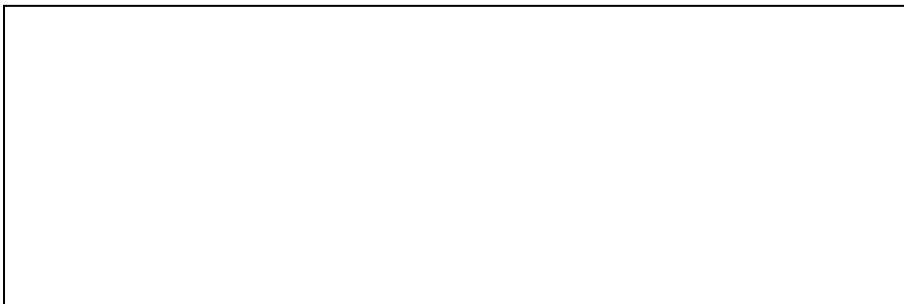
Objektiv bez této vady se nazývá ***anastigmat*** (odstranění vad při výrobě vsazením čoček do objímek a použitím speciálních druhů skel).

Krom kombinace rozptylek a spojek vyrobených ze skel s různými indexy lomu zmírňuje uvedené vady také vignetování (vyloučení paprsků vzdálenějších od osy zmenšováním průměru čoček směrem do objektivu a vsazování čoček do objímek).

Dále se vady zmírňují odstraněním paprsků šikmo dopadajících do objektivu pomocí antireflexní vrstvy, která se nanáší na vnější stěnu přední čočky. Má dobrý vliv i na světelnost objektivu.

#### e) **zklenutí pole**

- rovina se nezobrazí do roviny kolmé na optickou osu, ale na plochu vydutou nebo vypuklou; zobrazení není ostré v celé ploše snímku, nelze současně zaostřit na střed i okraj snímku

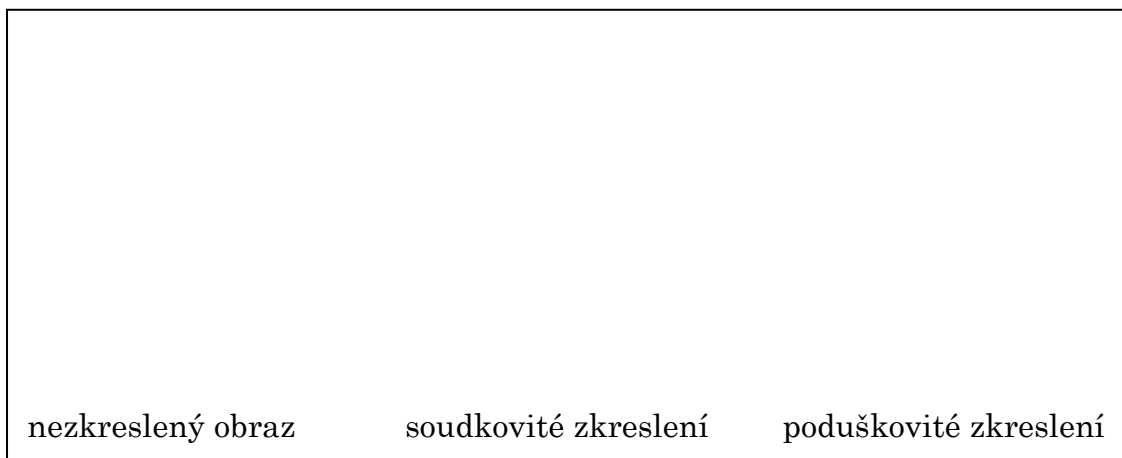


### 3. Zkreslení snímku

- má přímý vliv na geometrii zobrazení a přesnost měření na snímku (mění polohu bodů v obraze)

a) **geometrické zkreslení**

- síť pravoúhlých přímek se zobrazí soudkovitě nebo poduškovitě zkreslená

b) **radiální a tangenciální zkreslení (distorze)**

- projevují se u každé čočky, ale také u celého objektivu;  
způsobují je nepřesnosti výbrusu čoček a jejich sestavení na optické ose

**Radiální distorze  $\Delta r'$**  je posunutí zobrazeného bodu oproti správné poloze v radiálním směru (od středu k okrajům). Na výsledné zkreslení má symetrický vliv, pokud působí ve všech směrech stejnou hodnotou.<sup>2</sup>

**Tangenciální distorze  $\Delta t'$**  působí kolmo na směr radiální distorze. Vyvolává drobné těžko postižitelné lokální posuny, které můžeme u kvalitních měřických objektivů zanedbat. U neměřických komor může zvláště na okrajích snímku nabývat i velkých hodnot. Na výsledné zkreslení má nesymetrický vliv.<sup>3</sup>



<sup>2</sup> *Radiální* znamená ve směru průvodiče (poloměr – rádus).

<sup>3</sup> *Tangenciální* znamená ve směru tečny (tangenty).

Podle velikosti radiální distorze dělíme objektivy komor i komory samotné do tří skupin:

- **měřické** (speciální zařízení určená pro pořizování měřických snímků):  
 $\Delta r' \leq 10 \mu m$  (na okrajích snímku)
- **semiměřické** (kvalitní fotoaparáty uzpůsobené pro měřické účely):  
 $\Delta r'$  až  $200 \mu m$  (na okrajích snímku), předpokládáme symetrický vliv
- **neměřické** (běžné kvalitní fotoaparáty):  
 $\Delta r'$  až  $1 mm$  (na okrajích snímku), působí i nesymetrický vliv

➤ **Záznam a odstranění vlivu radiální distorze:**

a) **analyticky** – velikost a průběh distorze uvádí výrobce v kalibračním protokolu pomocí členů polynomu (mnohočlenu)  $a_0$  až  $a_n$  v 1 až 8 směrech (oktantech) od středu snímku.<sup>4</sup> Opravy z vlivu distorze jsou přiřazeny k měřeným souřadnicím na snímku při zpracování v počítači.

$$\Delta r' = a_0 + a_1 \cdot r' + a_2 \cdot r'^2 + a_3 \cdot r'^3 + a_4 \cdot r'^4 + a_5 \cdot r'^5$$

b) **charakteristickou křivkou** – znázorňuje velikost a průběh distorze v závislosti na vzdálenosti od středu snímku, tj. radiální vzdálenosti  $r'$ . Zobrazuje průběh polynomu zkreslení v jednom směru nebo pro každý oktant.



c) **průměrnou hodnotou** – zanedbávají se změny velikosti zkreslení v závislosti na vzdálenosti od středu snímku a uvažuje se jedna průměrná hodnota zkreslení pro všechny body ve všech směrech.

d) **graficky** – pomocí izolinií (křivek stejného zkreslení); izočáry vykreslené na průsvitce vyjadřují vliv distorze na souřadnice. Při bodovém vyhodnocení bez použití výpočetní techniky se zjišťují opravy souřadnic interpolací.

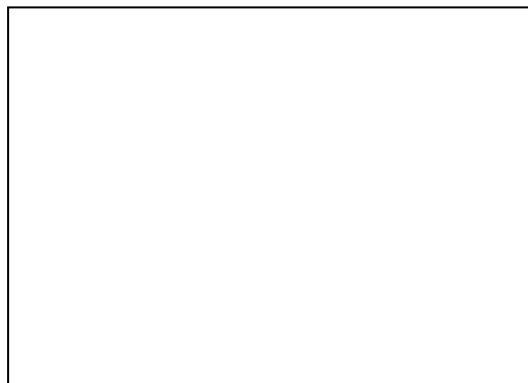
<sup>4</sup> Určuje se při kalibraci komory spolu s dalšími hodnotami prvků vnitřní orientace zpracováním nadbytečného počtu měření (tj. vyrovnáním).



symetrický vliv



nesymetrický vliv



vliv tangenciální distorze

– při použití analogových vyhodnocovacích strojů byly možné i tyto postupy odstranění vlivu distorze:

e) **optickým promítáním** – používal se průchod paprsků skrz objektiv podobných vlastností jako má komora opačným směrem než při snímkování. Platilo pravidlo používání vyhodnocovacího přístroje od stejné firmy jako je komora.

f) **kompensačními deskami** – položeny na snímku lámou chod pozorovacích paprsků v opačném směru než je vliv distorze.

g) **mechanicky** – měněna konstanta komory v závislosti na průběhu distorze.

### 2.3. Snímkové orientace a souřadnicové soustavy – geometrické základy

Abychom mohli dobře popsat systém snímkových souřadnic, je třeba nejdříve definovat prvky vnitřní orientace. Následovat budou systémy souřadnic modelových a geodetických a na závěr prvky vnější orientace.

#### ➤ prvky vnitřní orientace (interní)

Popisují geometrické uspořádání uvnitř měřické komory a tím i středové promítání, kterým vzniká snímek. Pro každý měřický snímek musí být známé.



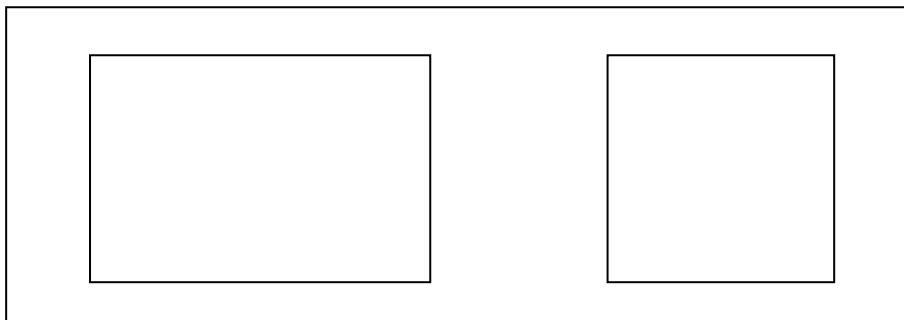
Zobrazení objektivem měřické komory při zaostření na nekonečno <sup>1</sup>

O – střed vstupní pupily;  
H' – hlavní bod;

O' – střed výstupní pupily;  
 $\Delta r'$  – velikost radiální distorze (zkreslení);

a) **konstanta komory  $f_k$**  je vzdálenost mezi středem výstupní pupily O' a hlavním bodem snímku H' (měřená po optické ose).<sup>2</sup> Určuje se pro měřické komory s přesností na 0,01 mm.

b) **poloha hlavního bodu H'** [ $x_0'$ ,  $z_0'$ ] v pozemní fotogrammetrii, H' [ $x_0'$ ,  $y_0'$ ] v letecké fotogrammetrii<sup>3</sup> se udává vzhledem ke *středu snímku M'* (průsečík spojnic rámových značek); tj. rozdílem snímkových souřadnic od středu snímku.



<sup>1</sup> Měřické komory bývají pevně zaostřeny (nejčastěji na nekonečno). Pokud je přeostrění možné, tak pouze v korecích (na výrobcem zvolené hodnoty) – dochází ke změně konstanty komory, která musí být známá.

<sup>2</sup> Není totožná s ohniskovou vzdáleností.

<sup>3</sup> Dříve se poloha hlavního bodu označovala v pozemní fotogrammetrii H' [dx, dz] a v letecké H' [dx, dy].



**Hlavní bod** je průsečíkem roviny snímku s optickou osou; se středem snímku není totožný, ale leží v jeho blízkosti.<sup>4</sup> Pro práce menší přesnosti je možné rozdíl v poloze hlavního bodu a středu snímku zanedbat.

c) **průběh radiální distorze  $\Delta r'$**

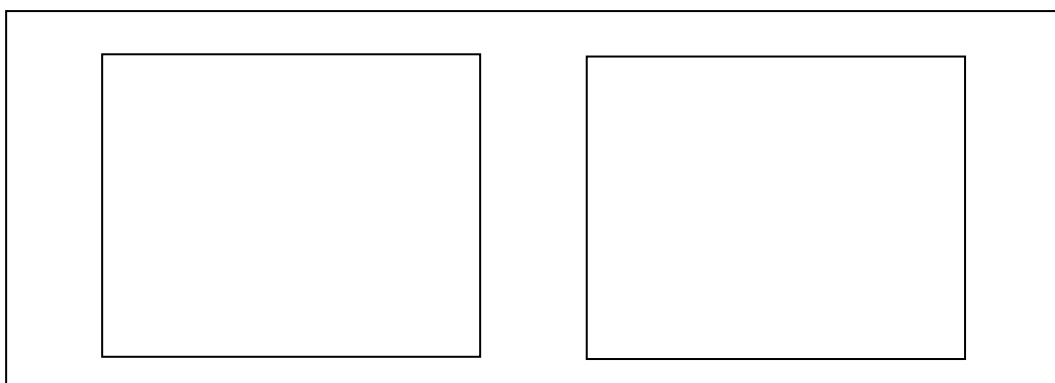
Udává se členy polynomu (analyticky), charakteristickou křivkou, průměrnou hodnotu nebo graficky. Radiální distorze je posunutí zobrazeného bodu oproti správné poloze v radiálním směru (od středu k okrajům snímku). U měřických objektivů nesmí být její velikost větší než  $10 \mu m$  (viz. kapitola 2.2 – zkreslení snímku).

Prvky vnitřní orientace musejí být určeny ke každé měřické komoře a výrobce je uvádí v kalibračním protokolu.

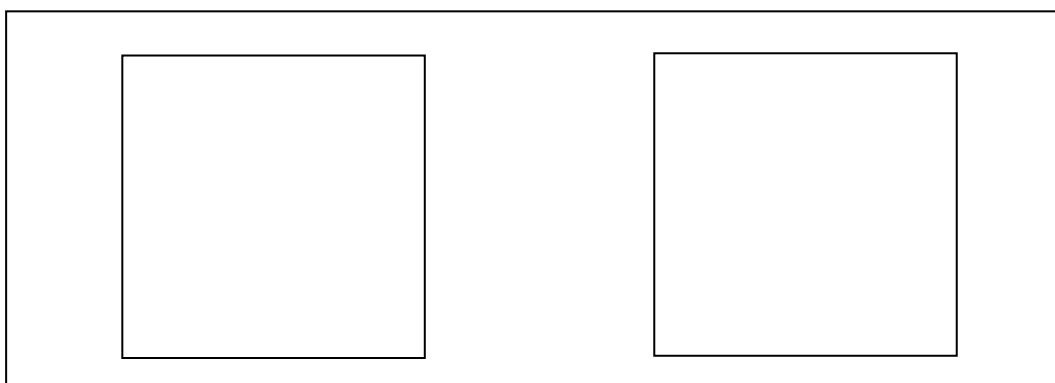
➤ **souřadnicové soustavy**

a) **snímkové souřadnice** – souřadnice měřené v rovině snímku; uvádějí se v *mm* s přesností na 0,01 nebo 0,001 mm. Počátkem soustavy snímkových souřadnic je hlavní bod  $H'$ . Hlavní bod nelze na snímku snadno vyhledat, proto souřadnice měříme od středu snímku  $M'$  a zavádíme opravy na polohu hlavního bodu  $H'(x_0', z_0')$ , resp.  $H'(x_0', y_0')$ . Osy jsou rovnoběžné se spojnicemi rámových značek.

- pozemní fotogrammetrie:  $(x', z')$  – levý snímek,  $(x'', z'')$  – pravý snímek;



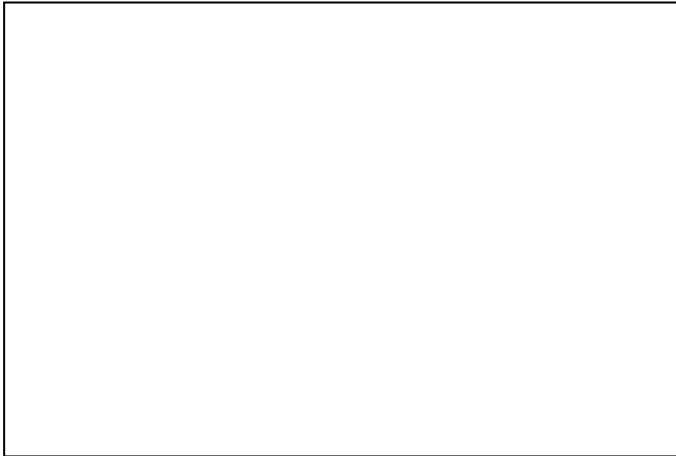
- letecká fotogrammetrie:  $(x', y')$  – levý snímek,  $(x'', y'')$  – pravý snímek



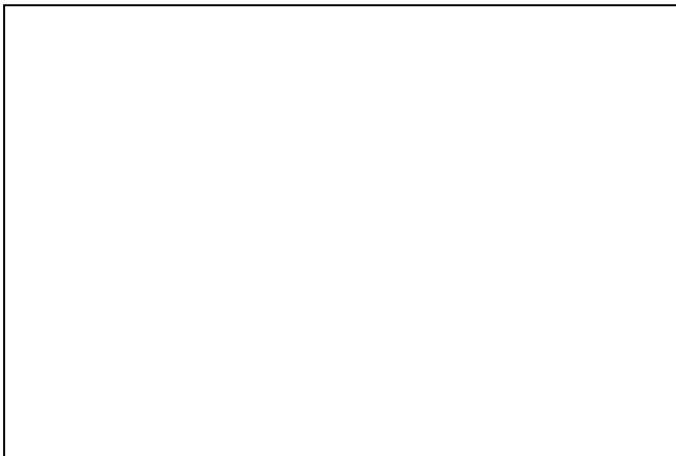
<sup>4</sup> Velikost rozdílů v poloze hlavního bodu a středu snímku závisí na přesnosti sestavení objektivu a těla komory při výrobě.

b) **modelové souřadnice** (prostorové) –  $(x, y, z)$  měříme pomocí umělého stereoskopického vjemu na prostorovém modelu a uvádíme v *mm* s přesností na 0,01 mm. Počátkem soustavy je *střed vstupní pupily* (na levém stanovisku) a osa  $x$  směřuje do středu vstupní pupily na stanovisku pravém (je přibližně rovnoběžná se základnou), resp. ve směru letu v letecké fotogrammetrii.

- pozemní fotogrammetrie: prostorová souřadnice (osa  $y$ ) směřuje do předmětového prostoru před objektivem;



- letecká fotogrammetrie: prostorová souřadnice (záporná větev osy  $z$ ) směřuje k zemskému povrchu;



Osa  $z$  vždy směřuje do zenitu (v letecké i pozemní fotogrammetrii).

c) **geodetické souřadnice** –  $[X, Y, Z]$  vyjadřují skutečný tvar, velikost a polohu předmětů; uvádějí se v *m* nejčasněji s přesností na 0,01 m.<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Geodetické souřadnice nejsou totožné se systémem Jednotné trigonometrické sítě katastrální S-JTSK. Do národních souřadnicových systémů musejí být geodetické souřadnice  $X$  a  $Y$  převedeny transformací (podobnostní) a souřadnice  $Z$  je převedena na nadmořské výšky (např. Bpv).

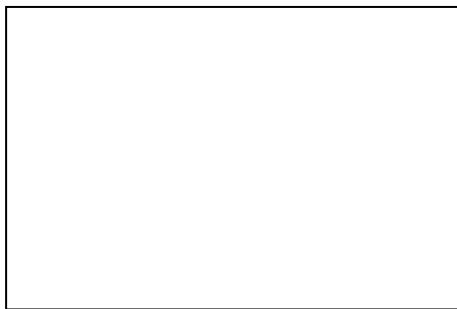
➤ **prvky vnější orientace (externí)**

Popisují polohu středu vstupní pupily na stanovisku (v okamžiku pořízení snímku) v geodetických souřadnicích  $[X_0, Y_0, Z_0]$ , orientaci osy záběru a sklon komory v prostoru. Rozdělujeme je do dvou skupin:

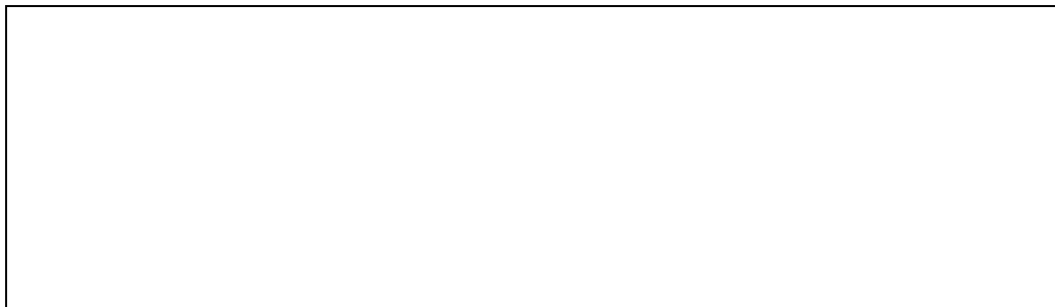
- a) **lineární**  $[X_0, Y_0, Z_0]$  – geodetické souřadnice středu vstupní pupily
- b) **úhlové**  $(\kappa, \varphi, \omega)$  – orientace osy záběru a sklon komory

– **pozemní fotogrammetrie**

$\kappa$  – **pootočení snímku** ve vlastní rovině (svislý úhel, otáčí se kolem osy  $y$ ); pokud se úhel  $\kappa = 0$  snímek není ve vlastní rovině stočený (spojnice rámových značek jsou vodorovné, resp. svislé)



$\varphi$  – **orientační úhel** (vodorovný úhel, otáčí se kolem osy  $z$ ); pro  $\varphi = 0$  nastává **normální případ** (osy záběru jsou kolmé k základně)

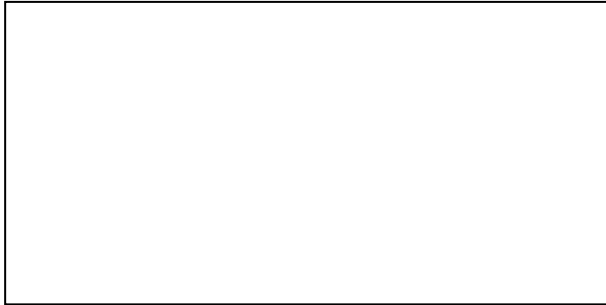


A – levé stanovisko základny;                      B – pravé stanovisko základny;  
z – základna (také označovaná b – base)

Z praktických důvodů se počátek při měření (resp. nastavení) úhlu  $\varphi$  vkládá do protějšího bodu základny a měří se ve směru chodu hodinových ručiček (od základny k ose záběru). Pro velikost orientačního úhlu pak platí  $\varphi = 3R - \varphi'$ , kde  $\varphi'$  je v terénu měřená hodnota. Pro kladné úhly  $\varphi$  nastává **vlevostočený případ**, pro záporné úhly  $\varphi$  **vpravostočený případ**; ovšem v zápisnících se označují opačným znaménkem – vpravostočený  $(+\varphi)$  a vlevostočený  $(-\varphi)$ .

Písmeny A, B a L, R se označují snímky z levého resp. pravého stanoviska s normálním, resp. vlevo nebo vpravo stočeným případem. Možné kombinace pro jednu snímkovou dvojici jsou: A a B (normální případ), nebo AL a BL, nebo AR a BR.

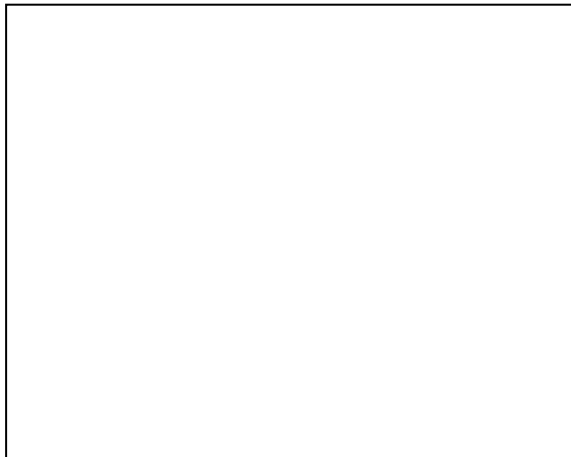
**$\omega$**  – **sklon osy záběru** (svislý úhel, otáčí se kolem osy  $x$ );  
pokud se úhel  $\omega = 0$  je osa záběru vodorovná



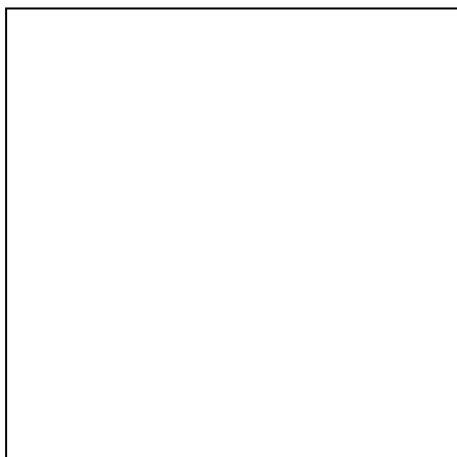
V pozemní dvousnímkové fotogrammetrii nastavujeme úhly  $\kappa$  a  $\omega$  pomocí křížových libel na měřické komoře a úhel  $\phi$  vodorovným kruhem s odečítací pomůckou a dalekohledem (tj. orientační soustavou měřické komory).

– *letecká fotogrammetrie*

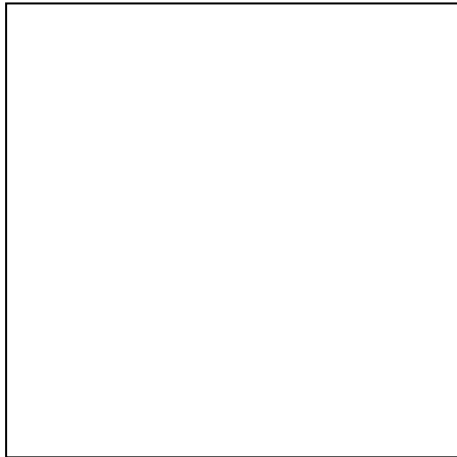
**$\kappa$**  – **pootočení snímku** ve vlastní rovině (vodorovný úhel, otáčí se kolem osy  $z$ );  
pokud se úhel  $\kappa = 0$  spojnice rámových značek směřuje ve směru letu



**$\phi$**  – **podélný sklon** osy záběru ve směru letu (svislý úhel, otáčí se kolem osy  $y$ );  
pokud je úhel  $\phi \leq 3^\circ$  označujeme měřické snímky jako svislé



$\omega$  – **příčný sklon** osy záběru kolmo na směr letu (svislý úhel, otáčí se kolem osy  $x$ ); pokud je úhel  $\omega \leq 3^\circ$  označujeme měřické snímky jako svislé<sup>6</sup>



Jestliže jsou oba sklony (podélný i příčný) menší než  $3^\circ$  a osy záběru svislé, bude jejich vzájemná poloha téměř rovnoběžná a blíží se normálnímu případu dvousnímkové fotogrammetrie.

V letecké fotogrammetrii nastavujeme úhlové prvky vnější orientace pomocnými zařízeními měřické komory: sklony  $\varphi$  a  $\omega$  pomocí gyrostabilizace (udržuje osu záběru ve svislíci) a úhel  $\varphi$  regulátorem překrytu (umožňuje pořizovat vzhledem ke směru letu nestočené snímky s dostatečným překrytem).

Při vyhodnocování snímků letecké fotogrammetrie nejsou prvky vnější orientace známy přesně (během snímkového letu zjišťujeme pouze jejich přibližné hodnoty). Proto je považujeme za neznámé a určujeme jejich přesné hodnoty až před vyhodnocením (nebo současně s vyhodnocením). Oproti tomu v pozemní fotogrammetrii je možné (geodetickými metodami) prvky vnější orientace určit nebo nastavit přesně již při pořizování snímků v terénu.

### ➤ Tvar, poloha a orientace paprskového svazku

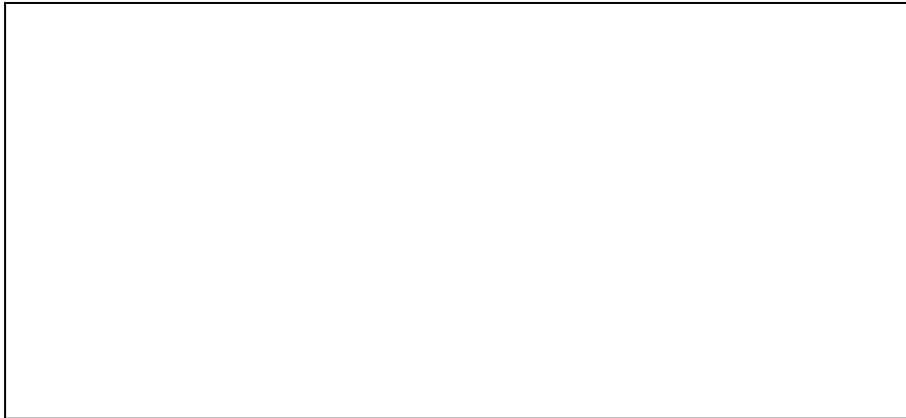
Pro definici prvků vnitřní a vnější orientace se často používá pojem *paprskový svazek*, který představuje všechny promítací paprsky známých i určovaných bodů. Přitom *promítací paprsek* je spojnice mezi body ve skutečnosti a jejich obrazy na snímku (v předmětovém a obrazovém prostoru).

Prvky vnitřní orientace definují  *tvar paprskového svazku*.

Prvky vnější orientace definují  *polohu a orientaci paprskového svazku* v prostoru.

<sup>6</sup> Dále se podle velikosti úhlů  $\varphi$  a  $\omega$  rozlišují snímky strmé ( $3-10^\circ$ ), šikmé ( $10-80^\circ$ ), ploché ( $80-90^\circ$ ) a vodorovné – horizontální ( $90^\circ$ ).

- pro pozemní fotogrammetrii



- pro leteckou fotogrammetrii



#### ➤ Rámové značky

- jsou zabudovány v zadní stěně komory – ve značkovém rámu
- všechny musí ležet v jedné rovině kolmé na osu záběru a totožné s rovinou snímku (na rámové značky dosedá matnice nebo kazeta s citlivým matriálem)
- známe jejich přesnou polohu ve snímkových souřadnicích (spolu s prvky vnitřní orientace od výrobce v kalibračním protokolu)
- při expozici se jejich obraz přeneše na negativ
- v pozemní fotogrammetrii jsou nejčastěji 4 ve středech stran snímku <sup>7</sup>
- v letecké fotogrammetrii je nejčastěji 8 značek ve středech stran a v rozích
- rámové značky mohou být mechanické (kovové výstupky nebo hroty) a optické (např. soustředné kružnice) uměle osvětlované



<sup>7</sup> U semiměřických réseau komory je zastupují křížky v celé ploše snímku (až 11x11 = 121 křížků) vyryté v planparalelní skleněné destičce.

## 2.4. Transformace souřadnic ve fotogrammetrii – matematické základy

### A. Transformace souřadnic v rovině

**Podobnostní transformace** provádí dva posuny (ve směru každé z os), jedno otočení (pro obě osy stejné) a změnu měřítka (pro obě osy stejnou) – mění se pouze poloha, natočení a velikost objektů v rovině – tvar zůstává nezměněný (objekty jsou si podobné). Pro vyřešení transformačního klíče je třeba zjistit 4 neznámé a k tomu potřebujeme znát souřadnice alespoň 2 identických bodů v obou soustavách.

*Využití:* transformace geodetických souřadnic bodů (nebo z místních systémů) do národních souřadnicových systémů (např. S-JTSK).

$$X = X_0 + m \cdot (x' \cdot \cos \varepsilon - y' \cdot \sin \varepsilon), \quad Y = Y_0 + m \cdot (x' \cdot \sin \varepsilon + y' \cdot \cos \varepsilon)^1$$

**Afinní transformace** provádí dva posuny, dvě (resp. jedno) otočení a dvě změny měřítka (pro každou osu jinou) – mění se poloha, natočení, velikost i tvar objektů v rovině. Pro vyřešení transformačního klíče je třeba zjistit 6 neznámých a k tomu potřebujeme znát souřadnice alespoň 3 identických bodů v obou soustavách.<sup>2</sup>

*Využití:* transformace (digitalizovaného) měřického snímku na rámové značky pro odstranění diferenční srážky – snímek získává správný rozměr.

$$X = X_0 + m_x \cdot (x' \cdot \cos \varepsilon - y' \cdot \sin \varepsilon), \quad Y = Y_0 + m_y \cdot (x' \cdot \sin \varepsilon + y' \cdot \cos \varepsilon)^1$$

**Polynomickou transformaci** je možné použít pouze v případě dostatečného množství a vhodného rozmístění identických bodů – jejich minimální počet se rovná polovině počtu neznámých transformačního klíče, který závisí na stupni polynomu (mnohočlenu)  $n$  v transformačních rovnicích a je dán vztahem  $(n+1) \cdot (n+2)$ .<sup>3</sup>

Dobrých výsledků lze dosáhnout pouze v oblastech s dostatečným množstvím rovnoměrně rozmístěných identických bodů, mezi kterými dochází k poměrně spolehlivé interpolaci souřadnic (tj. polohy) transformovaných bodů. V oblastech mimo identické body (nebo při jejich nevhodném rozložení) dochází k extrapolaci a nová poloha transformovaných bodů je chybná, objevují se deformace velikosti i tvaru zobrazených objektů.

*Využití:* především v dálkovém průzkumu Země, např. pro umístění (georeferencování) družicových snímků do národních souřadnicových soustav (bez ohledu na příslušné kartografického zobrazení).

$$X = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_n \cdot x^n, \quad Y = b_0 + b_1 \cdot y + b_2 \cdot y^2 + \dots + b_n \cdot y^n$$

<sup>1</sup> V těchto rovnicích  $x'$  a  $y'$  označují souřadnice ve vedlejší soustavě (nikoli snímkové) a  $X, Y$  souřadnice v hlavní soustavě (nikoli geodetické).

<sup>2</sup> Z praktických důvodů se v afinní transformaci používá pouze jedno otočení, jinak by totiž nebyla zachována pravoúhlost os souřadnicové soustavy. Požadavek na minimálně 3 identické body zůstává.

<sup>3</sup> Pokud je polynom prvního stupně ( $n=1$ ) přechází polynomická transformace na afinní.

**Kolineární (projektivní) rovinná transformace** vyjadřuje středové promítání z roviny na rovinu – tedy vztah dvou rovin, kterými jsou ve fotogrammetrii rovina snímku a rovina mapy nebo plánu. Transformační klíč obsahuje osm neznámých, pro jejichž určení potřebujeme znát polohu alespoň 4 identických bodů na snímku i v mapě. Kolineární transformace nezachovává délky, úhly ani plochy. Zachovává pouze *dvojpoměr čtveřice bodové* – tzn. poměr dvou dělicích poměrů délkových úseků mezi body na jedné přímce; přitom přímka se zobrazí jako přímka. Tuto skutečnost vyjadřuje také *Pappova věta*: dvojpoměr čtveřice bodové se středovým průmětem z roviny na rovinu nemění.



$$\frac{\frac{AC}{BC}}{\frac{AD}{BD}} = \frac{\frac{A'C'}{B'C'}}{\frac{A'D'}{B'D'}}$$

*Využití:* zásadní význam v jednosnímkové fotogrammetrii pro *překreslení snímku*, které se provádí *kolineární rovinnou transformací rastru* (tj. digitálního nebo digitalizovaného snímku).<sup>4</sup> Transformace mění polohu pixelu v rastrovém digitálním obrazu. Musí být splněn požadavek na rovinatost terénu nebo objektu (bez větších převýšení a výstupků), který touto metodou vyhodnocujeme.

$$X_m = \frac{a_1 \cdot x' + a_2 \cdot y' + a_3}{c_1 \cdot x' + c_2 \cdot y' + 1}, \quad Y_m = \frac{b_1 \cdot x' + b_2 \cdot y' + b_3}{c_1 \cdot x' + c_2 \cdot y' + 1},$$

kde  $x'$  a  $y'$  jsou souřadnice bodu na snímku,  $X_m$  a  $Y_m$  jsou souřadnice bodu na mapě,  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  je osm koeficientů transformačního klíče.

### B. Transformace souřadnic v prostoru

Ve fotogrammetrii nejčastěji řešíme převod rovinných snímkových souřadnic na prostorové souřadnice geodetické. Pro tento účel využíváme kombinace *středového promítání (lineární perspektivy)* mezi rovinou a prostorem s *podobnostní prostorovou transformací* (posunutí, otočení a změna měřítko v prostoru). Pokud obě transformace spojíme do jednoho kroku, získáváme přímý převod mezi snímkovými a geodetickými souřadnicemi pomocí *prostorové projektivní transformace*.<sup>5</sup>

<sup>4</sup> Dříve se překreslení provádělo opticko-mechanicky na *překreslovačích*, které musely zajistit zcela stejné vztahy mezi rovinou snímku a rovinou mapy.

<sup>5</sup> Projektce = promítání. Provádíme středový průmět ze skutečnosti (předmětového prostoru) do roviny snímku (obrazového prostoru) a naopak – z rovinných snímkových souřadnic získáváme prostorové souřadnice geodetické.



Možné jsou tedy dva postupy:

- *nepřímý převod*:  $x', y', x'', y'', -f \rightarrow x, y, z \rightarrow X, Y, Z$  (pro leteckou fot.)  
 $x', z', x'', z'', f \rightarrow x, y, z \rightarrow X, Y, Z$  (pro pozemní fot.)

Na dvojici snímků změřené souřadnice  $x', y', x'', y''$  (resp.  $x', z', x'', z''$ ) mohou být díky známým prvkům vnitřní orientace ( $f$  – konstanta komory) pomocí *lineární perspektivy* převedeny na souřadnice modelové  $x, y, z$  a dále *podobnostní prostorovou transformací* na souřadnice geodetické  $X, Y, Z$ .

- *přímý převod*:  $x', y', x'', y'', -f \rightarrow X, Y, Z$  (pro leteckou fot.)  
 $x', z', x'', z'', f \rightarrow X, Y, Z$  (pro pozemní fot.)

Na dvojici snímků změřené souřadnice  $x', y', x'', y''$  (resp.  $x', z', x'', z''$ ) mohou být díky známým prvkům vnitřní orientace ( $f$  – konstanta komory) pomocí *prostorové projekční transformace* převedeny přímo na souřadnice geodetické  $X, Y, Z$ .

V případě letecké fotogrammetrie se u konstanty komory  $f$  objevuje záporné znaménko, protože její směr je vzhledem k ose  $z$  opačný.

### Středové promítání – lineární perspektiva

*Lineární perspektiva* je zvláštním případem *středového promítání*, kdy zobrazujeme část trojrozměrného prostoru (vymezeného rotační kuželovou plochou) do roviny (průmětny), která je kolmá na osu promítání (osu kuželové plochy). Ve fotogrammetrii rozumíme průmětnou rovinu snímku, osou promítání osu záběru a promítací vzdáleností je konstanta komory  $f$ . Pro systém snímkových a systém modelových souřadnic s počátkem ve středu promítání  $O$  potom platí:

$$\frac{x'}{f} = \frac{x}{-z}, \quad \frac{y'}{f} = \frac{y}{-z} \quad \text{a} \quad \frac{x''}{f} = \frac{x}{-z}, \quad \frac{y''}{f} = \frac{y}{-z} \quad (\text{pro leteckou fot.})^6$$

$$\frac{x'}{f} = \frac{x}{y}, \quad \frac{z'}{f} = \frac{z}{y} \quad \text{a} \quad \frac{x''}{f} = \frac{x}{y}, \quad \frac{z''}{f} = \frac{z}{y} \quad (\text{pro pozemní fot.})$$

Rovnice vyjadřují vztah mezi rovinnými snímkovými souřadnicemi ( $x', y', x'', y''$  resp.  $x', z', x'', z''$ ), modelovými souřadnicemi ( $x, y$  resp.  $x, z$ ) a mezi konstantou komory  $f$  a prostorovou modelovou souřadnicí ( $z$  resp.  $y$ ).

*Využití*: ve dvousnímkových metodách, kde umožňuje z měřených rovinných snímkových souřadnic vypočítat prostorové modelové souřadnice bodů. Zohledňuje radiální posuny bodů způsobené středovým promítáním.

<sup>6</sup> V rovnicích pro leteckou fotogrammetrii lze záporné znaménko přiřadit buď konstantě komory ( $-f$ ) nebo prostorové souřadnici ( $-z$ ) – jejich směr je opačný.

**Podobnostní prostorová transformace** provádí tři posuny (ve směru tří os), otočení okolo tří os a jednu změnu měřítka. Pro vyřešení těchto sedmi neznámých transformačního klíče potřebujeme znát tři souřadnice alespoň u 3 identických bodů v obou soustavách.<sup>7</sup> Tato transformace se také nazývá sedmiprvková.

*Využití:* převod souřadnic mezi dvěma prostorovými soustavami modelových a geodetických souřadnic – tj. absolutní orientace modelu.

Prostorovou transformaci lze vyjádřit ve vektorovém zápisu:  $X = X_0 + m \cdot R \cdot x$ ,

kde  $X$  je vektor geodetických souřadnic určovaného bodu ( $X, Y, Z$ ),  $X_0$  je vektor geodetických souřadnic středu vstupní pupily  $O (X_0, Y_0, Z_0)$  vyjadřující posuny podél tří os geodetického systému,  $m$  je měřítkový koeficient (jedno číslo shodné pro všechny tři souřadnice),  $R$  je matice rotace popisující otočení (rotaci) kolem tří os a  $x$  je vektor modelových souřadnic určovaného bodu.

Rotační matice  $R_{\omega, \varphi, \kappa} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$  obsahuje devět členů  $r_{i,j}$  s kombinacemi

sinů a kosinů rotačních úhlů  $\kappa, \varphi, \omega$  (otočení komory a sklony osy záběru).

**Projektivní (kolineární) prostorová transformace** je základem všech moderních aplikací dvousnímkové fotogrammetrie (analytických a digitálních metod vyhodnocení) a pro tvorbu digitálního orotofota.

*Využití:* přímý převod mezi rovinnými snímkovými a prostorovými geodetickými souřadnicemi.

Každá snímková dvojice má 12 prvků vnější orientace (tři lineární a tři úhlové pro každý snímek). K jejich přesnému určení<sup>8</sup> potřebujeme znát tři souřadnice alespoň 3 identických bodů v překrytovém území snímkové dvojice. Prvky vnitřní orientace jsou pro měřické snímky známé.

Pokud rozšíříme vztah mezi snímkovými a modelovými souřadnicemi o redukci na polohu hlavního bodu  $H'(x_0', y_0')$  dostáváme rovnice:

$$\frac{x' - x_0'}{-f} = \frac{x}{z}, \quad \frac{y' - y_0'}{-f} = \frac{y}{z} \quad \text{pro levý snímek}$$

$$\text{a pro pravý snímek} \quad \frac{x'' - x_0''}{-f} = \frac{x}{z}, \quad \frac{y'' - y_0''}{-f} = \frac{y}{z}.$$

<sup>7</sup> Teoreticky postačují dva celé body se souřadnicemi  $X, Y, Z$  a u třetího bodu jen jedna souřadnice (např. výška  $Z$ ), tj. celkem sedm číselných hodnot.

<sup>8</sup> V letecké fotogrammetrii jsou známé jen přibližné hodnoty prvků vnější orientace určované pomocnými zařízeními letecké měřické komory během snímkového letu.

Dosazením do rovnic prostorové podobnostní transformace a jejich úpravou získáváme rovnice pro přímý převod snímkových souřadnic na geodetické:

$$\begin{aligned} X &= X_0^L + (Z - Z_0^L) \cdot \frac{r_{11}^L \cdot (x' - x_0') + r_{12}^L \cdot (y' - y_0') - r_{13}^L \cdot f}{r_{31}^L \cdot (x' - x_0') + r_{32}^L \cdot (y' - y_0') - r_{33}^L \cdot f}, \\ Y &= Y_0^L + (Z - Z_0^L) \cdot \frac{r_{21}^L \cdot (x' - x_0') + r_{22}^L \cdot (y' - y_0') - r_{23}^L \cdot f}{r_{31}^L \cdot (x' - x_0') + r_{32}^L \cdot (y' - y_0') - r_{33}^L \cdot f}, \end{aligned} \quad (\text{pro levý snímek})$$

Rovnice obsahují prostorovou souřadnici  $Z$ , kterou lze získat jen pomocí dvou snímků. Pro druhý (pravý) snímek platí další soustava rovnic:

$$\begin{aligned} X &= X_0^P + (Z - Z_0^P) \cdot \frac{r_{11}^P \cdot (x'' - x_0'') + r_{12}^P \cdot (y'' - y_0'') - r_{13}^P \cdot f}{r_{31}^P \cdot (x'' - x_0'') + r_{32}^P \cdot (y'' - y_0'') - r_{33}^P \cdot f}, \\ Y &= Y_0^P + (Z - Z_0^P) \cdot \frac{r_{21}^P \cdot (x'' - x_0'') + r_{22}^P \cdot (y'' - y_0'') - r_{23}^P \cdot f}{r_{31}^P \cdot (x'' - x_0'') + r_{32}^P \cdot (y'' - y_0'') - r_{33}^P \cdot f}, \end{aligned} \quad (\text{pro pravý snímek})$$

Po určení prvků transformačního klíče (přesných hodnot vnější orientace snímků) lze řešením soustavy čtyř rovnic o třech neznámých získávat z rovinných souřadnic měřených na dvou snímcích tři prostorové geodetické souřadnice každého bodu. V rovnicích jsou označeny:

$x', y', x'', y''$  ... měřené **snímkové souřadnice** na levém a pravém snímku,

známé **prvky vnitřní orientace**:

$f$  ... konstanta komory,

$x_0', y_0', x_0'', y_0''$  ... poloha hlavního bodu  $H'$  na levém snímku a poloha hlavního bodu  $H''$  na pravém snímku; pokud byla použita stejná měřická komora jsou souřadnice obou bodů totožné,

transformační klíč, tzn. **prvky vnější orientace** každého snímku:

$X_0^L, Y_0^L, Z_0^L$  ... geodetické souřadnice středu vstupní pupily levého snímku,  
 $X_0^P, Y_0^P, Z_0^P$  ... geodetické souřadnice středu vstupní pupily pravého snímku,

$r_{ij}^P$  ... prvky matice rotace obsahující kombinace sinů a kosinů rotačních úhlů  $\kappa, \varphi, \omega$  (otočení komory a sklony osy záběru) pravého snímku,

$r_{ij}^L$  ... prvky matice rotace obsahující kombinace sinů a kosinů rotačních úhlů  $\kappa, \varphi, \omega$  (otočení komory a sklony osy záběru) levého snímku,

výsledné hodnoty:

$X, Y, Z$  ... **geodetické souřadnice** určovaného bodu

Pro pozemní fotogrammetrii nabývají rovnice tohoto tvaru:

$$X = X_0^L + (Y - Y_0^L) \cdot \frac{r_{11}^L \cdot (x' - x_0') + r_{12}^L \cdot (z' - z_0') + r_{13}^L \cdot f}{r_{31}^L \cdot (x' - x_0') + r_{32}^L \cdot (z' - z_0') + r_{33}^L \cdot f}$$

$$Z = Z_0^L + (Y - Y_0^L) \cdot \frac{r_{21}^L \cdot (x' - x_0') + r_{22}^L \cdot (z' - z_0') + r_{23}^L \cdot f}{r_{31}^L \cdot (x' - x_0') + r_{32}^L \cdot (z' - z_0') + r_{33}^L \cdot f}$$

$$X = X_0^P + (Y - Y_0^P) \cdot \frac{r_{11}^P \cdot (x'' - x_0'') + r_{12}^P \cdot (z'' - z_0'') + r_{13}^P \cdot f}{r_{31}^P \cdot (x'' - x_0'') + r_{32}^P \cdot (z'' - z_0'') + r_{33}^P \cdot f}$$

$$Z = Z_0^P + (Y - Y_0^P) \cdot \frac{r_{21}^P \cdot (x'' - x_0'') + r_{22}^P \cdot (z'' - z_0'') + r_{23}^P \cdot f}{r_{31}^P \cdot (x'' - x_0'') + r_{32}^P \cdot (z'' - z_0'') + r_{33}^P \cdot f}$$

**Direktní (přímá) lineární transformace (DLT)** se používá v případech, kdy pro snímky nejsou prvky vnitřní orientace (PVO)  $f, H'(x_0', y_0')$  známé (např. u neměřických komor, historických snímků nebo výřezů snímků s neznámou polohou středu). Pro vyřešení 11 prvků transformačního klíče (koeficientů  $a_i, b_i, c_j$ ) je třeba znát souřadnice alespoň 6 vlíčovacích bodů. Protože hledáme prostorové geodetické souřadnice ( $X, Y, Z$ ), potřebujeme pro každý bod měřené snímkové souřadnice alespoň ze dvou snímků ( $x', y', x'', y''$ ): stereoskopických dvojic nebo průsekových záběrů.

*Využití:* přímý převod mezi snímkovými s geodetickými souřadnicemi (také pro neměřické snímky nebo průsekové záběry) a pro určení neznámých prvků vnitřní orientace (PVO) – tj. pro kalibraci komory.

Transformační rovnice vznikly zobecněním kolineární transformace:

$$x' = \frac{a_1 \cdot X + a_2 \cdot Y + a_3 \cdot Z + a_4}{c_1 \cdot X + c_2 \cdot Y + c_3 \cdot Z + 1}$$

$$y' = \frac{b_1 \cdot X + b_2 \cdot Y + b_3 \cdot Z + b_4}{c_1 \cdot X + c_2 \cdot Y + c_3 \cdot Z + 1}$$

Prvky vnitřní orientace lze ze známých koeficientů transformačního klíče určit pomocí těchto rovnic:

$$x_0' = (a_1 \cdot c_1 + a_2 \cdot c_2 + a_3 \cdot c_3) \cdot d^2, \quad y_0' = (b_1 \cdot c_1 + b_2 \cdot c_2 + b_3 \cdot c_3) \cdot d^2, \quad \text{kde } d^2 = \frac{1}{c_1^2 + c_2^2 + c_3^2}$$

$$f = \frac{f_x + f_y}{2}, \quad \text{kde } f_x = \sqrt{(a_1^2 + a_2^2 + a_3^2) \cdot d^2 - x_0'^2} \quad \text{a} \quad f_y = \sqrt{(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2) \cdot d^2 - y_0'^2}$$

## 2.5. Vlíčovací body

Pomocí vlíčovacích bodů (VB) určujeme vztah mezi snímkem (pro jednosnímkovou fot.) nebo prostorovým modelem (pro dvousnímkovou fot.) a mapou (při analogovém vyhodnocení) nebo geodetickými souřadnicemi (při analytickém vyhodnocení). Používáme je jako identické body při transformacích. Umožňují umístit snímek a jeho obsah do systému geodetických souřadnic.

V pozemní stereofotogrammetrii, pokud známe prvky vnější orientace s dostatečnou přesností, mají vlíčovací body kontrolní charakter. V letecké fotogrammetrii jsou nutné pro zpřesnění přibližných hodnot prvků vnější orientace.

### ➤ Vlastnosti vlíčovacích bodů

- leží na vyhodnocovaném terénu nebo objektu
- jsou jednoznačně identifikovatelné (rozpoznatelné) na snímku i v terénu
- mají určeny geodetické souřadnice přímým, dvojím nezávislým geodetickým měřením v terénu nebo fotogrammetricky pomocí snímkové triangulace
- přesnost určení a identifikace závisí na měřítku snímku; má být dvakrát vyšší než přesnost výsledného plánu nebo mapy (např. grafická přesnost výsledné mapy: 0,2 mm, pro vlíčovací body dvakrát vyšší: 0,1 mm, v měřítku 1:10 000 to znamená přesnost požadovaná pro určení vlíčovacího bodu: 1 m)
- mohou mít přirozenou nebo umělou signalizaci
- velikost signálu závisí na měřítkovém čísle snímku  $m_s$  a velikosti měřické značky

$$s = d \cdot m_s = d \cdot \frac{h}{f} \quad (\text{pro leteckou fot.}) \quad \text{nebo} \quad s = d \cdot m_s = d \cdot \frac{y}{f} \quad (\text{pro pozemní fot.}),$$

kde  $d = 0,05 \text{ mm}$  je průměr měřické značky ve vyhodnocovacím přístroji,<sup>1</sup>  
 $h$  výška letu,  $y$  vzdálenost předmětů před objektivem a  $f$  konstanta komory

### ➤ Volba vlíčovacích bodů

- *jednosnímková fotogrammetrie*

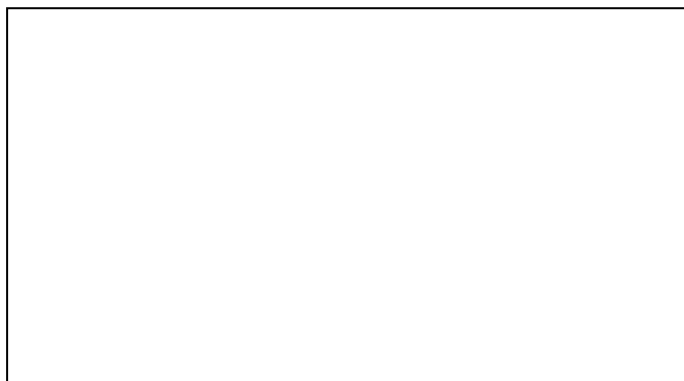
Pro překreslení snímku nebo kolineární rovinnou transformací rastru potřebujeme alespoň 4 vlíčovací body o dvou souřadnicích [X, Y], rovnoměrně rozmístěné v rovině překreslení (např. v rozích snímku) na vyhodnocovaném terénu nebo objektu.



<sup>1</sup> Velikost měřické značky se liší podle konkrétního výrobce a výrobku; 0,05 mm je průměrná hodnota.

– *dvousnímková fotogrammetrie (stereofotogrammetrie)*

Pro vnější orientaci snímkové dvojice potřebujeme alespoň 3 *vlíčovací body* o třech souřadnicích [X, Y, Z] v překrytové části snímků.



Uvedené počty vlíčovacích bodů jsou minimální pro danou metodu. Běžně ale volíme nadbytečný počet bodů, tak aby mohla být při vyhodnocení provedena kontrola a případně i vyrovnání zpřesňující výsledky vyhodnocení.<sup>2</sup>

➤ **Signalizace vlíčovacích bodů**

– *pozemní fotogrammetrie*

**přirozená signalizace:** rohy oken, dveří, křížení říms, vrcholy stožárů

**umělá signalizace:** papírové čtverce a kruhové terče na kůlu, cílová zařízení na stativu, samolepící reflexní terčičky (pro menší objekty, na kratší vzdálenosti)



– *letecká fotogrammetrie*

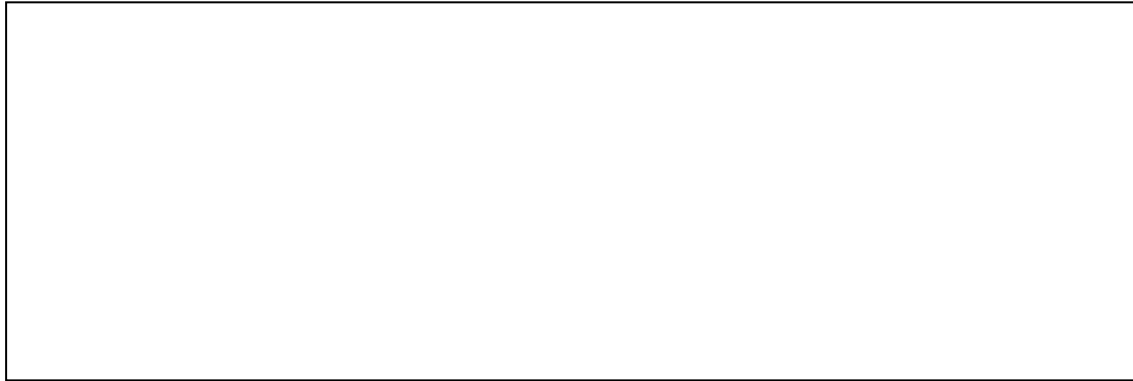
**přirozená signalizace** – pro malá a střední měřítko mapy: rohy pozemků, paty stožárů a osamělých stromů, křoviska, křižovatky, křížení cest a vodních toků

Výběr a vyznačení vlíčovacích bodů se provádí na snímcích až po provedeném snímkovém letu.

<sup>2</sup> Pro dvousnímkové metody nejčastěji 4-5 VB v překrytu. Pro jednosnímkové metody max. 8-12 VB.

**umělá signalizace** – pro velká měřítka mapy: dvouramenný, tříramenný a čtyřramenný křížový signál. Signalizují se body polohového bodového pole a body dočasně stabilizované.

Signalizace se provádí a následně kontroluje před snímkovým letem (tak aby se všechny signalizované body na snímcích zobrazily).



Pro mapování ve velkém měřítku se signalizují i vybrané podrobné body (např. lomové body na hranicích parcel). Používají se menší čtvercové signály.

Barva signálu má být proti okolnímu podkladu dostatečně kontrastní (nejčastěji bílá nebo žlutá). Používá se různorodý dostupný materiál, např. natřená lepenka, linoleum, koženka, polystyren, textil, naplněné plastové pytle, ve městech na asfaltu nátěr barvou.

➤ **Příklad rozměrů umělého signálu** pro mapování v měřítku 1:2 000

měřítkové číslo mapy:  $m_m = 2000$ ;

konstanta komory:  $f = 152 \text{ mm}$ ;

průměr měřické značky:  $d = 0,05 \text{ mm}$

měřítkové číslo snímku:  $m_s = 7000$ ;

výška letu:  $h = 1060 \text{ m}$ ;

– *signalizace VB čtyřramenným signálem*

průměr signálu:  $s = d \cdot m_s = 0,35 \text{ m}$  (strana čtverce středové části signálu)<sup>3</sup>

šířka ramene signálu:  $a = 1/2 \text{ až } 1/3 \cdot s = 0,15 \text{ m}$

délka ramene signálu:  $b = 3 \cdot s = 1 \text{ m}$

(zároveň má být délka ramene signálu 5 až 7x větší než šířka:  $b = 5 \text{ až } 7 \cdot a$ )

odstup ramene od středové části signálu:  $c = 2 \cdot s = 0,7 \text{ m}$

– *signalizace podrobného bodu čtvercovým signálem*

průměr signálu (resp. strana čtverce):  $s = 0,03 \text{ až } 0,02 \text{ mm} \cdot m_s = 0,2 \text{ m}$

(nejmenší rozpoznatelné signály totiž mohou být v měřítku snímku velké jen 0,03 až 0,02 mm)

<sup>3</sup> Vlivem přezáření bílé barvy na snímku se bude signál zobrazovat větší než průměr měřické značky.

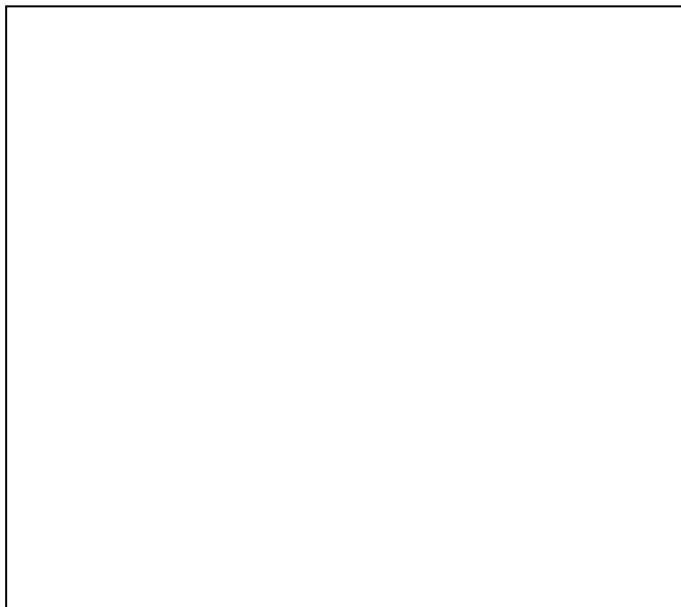
## 2.6. Stereoskopické vidění a měření

### ➤ přirozený stereoskopický vjem

**Stereoskopický vjem** je základem prostorového rozlišování bodů – umožňuje určit vzájemnou polohu bodů v prostoru. Je nezávislý na našich zkušenostech se zákony perspektivy – zmenšováním předmětů se vzrůstající vzdáleností, zakrýváním vzdálenějších předmětů předměty bližšími, ubýváním kontrastu barev se vzdáleností nebo pozorováním stínů.

### ➤ přirozené stereoskopické vidění

Vzniká v mozku prostřednictvím dvou zdravých očí schopných *akomodace* (změny zakřivení) oční čočky a *konvergence* (stočení) očních os tak, aby byl pozorovaný bod zaostřený a oční osy se na něm protínaly.<sup>1</sup>



**$b_0$  – oční základna**  
(běžně v rozmezí 60 až 70 mm),

**$\gamma$  – konvergenční úhel,**

**$d_\gamma$  – změna konvergenčního úhlu**  
(nejmenší hodnota, které jsou oči schopné)

**$y$  – vzdálenost předmětu**  
od pozorovatele,

**$d_y$  – přesnost stereoskopického pozorování,**

**Přesnost stereoskopického pozorování** můžeme vysvětlit jako nejmenší možnou změnu vzdálenosti, kterou jsou lidské oči ve směru od pozorovatele ještě schopné rozpoznat. Jeho teoretickou hodnotu lze odvodit z následujících vztahů:

$$\gamma = \frac{b_0}{y} \cdot \rho, \quad y = \frac{b_0}{\gamma} \cdot \rho \quad \text{a} \quad y = \frac{b_0}{\gamma} \cdot \rho, \quad y_1 = \frac{b_0}{\gamma_1} \cdot \rho, \quad \text{zároveň platí:}$$

$$\gamma < \gamma_1, \quad d_\gamma = \gamma_1 - \gamma \quad \text{a} \quad y > y_1, \quad d_y = y_1 - y$$

<sup>1</sup> Pro pochopení stavby a funkce oka je třeba znát pojmy: rohovka, bělma, duhovka, zornička, oční čočka, sklivec, sítnice, tyčinky, čípky, žlutá skvrna, oční nerv, slepá skvrna.



$$d_y = y - y_1 = \frac{b_0}{\gamma} \cdot \rho - \frac{b_0}{\gamma_1} \cdot \rho = \frac{b_0 \cdot \gamma_1}{\gamma \cdot \gamma_1} \cdot \rho - \frac{b_0 \cdot \gamma}{\gamma_1 \cdot \gamma} \cdot \rho = \frac{b_0 \cdot (\gamma_1 - \gamma)}{\gamma_1 \cdot \gamma} \cdot \rho \quad \left| \begin{array}{l} \gamma_1 - \gamma = d_\gamma \\ \gamma_1 \doteq \gamma \rightarrow \gamma_1 \cdot \gamma \doteq \gamma^2 \end{array} \right.$$

$$d_y = \frac{b_0}{\gamma^2} \cdot d_\gamma \cdot \rho \quad \left| \quad \Leftrightarrow \gamma = \frac{b_0}{y} \cdot \rho \right.$$

$$d_y = \frac{b_0 \cdot d_\gamma \cdot \rho}{\frac{b_0^2}{y^2} \cdot \rho^2} = \frac{b_0 \cdot y^2 \cdot d_\gamma \cdot \rho}{b_0^2 \cdot \rho^2} = \frac{y^2 \cdot d_\gamma}{b_0 \cdot \rho} \quad \Rightarrow \quad d_y = \frac{y^2}{b_0} \cdot \frac{d_\gamma''}{\rho''}$$

Je zřejmé, že přesnost stereoskopického pozorování  $d_y$  klesá se čtvercem (druhou mocninou) vzdálenosti a dále závisí na velikosti oční základny  $b_0$  a na nejmenší možné změně konvergenčního úhlu  $d_\gamma$ , které jsou oči schopné. Tato hodnota se liší podle toho, jaké předměty pozorujeme: pro liniové prvky (soustavu svislých rovnoběžných čar)  $d_\gamma = 10$  až  $20''$ , pro bodové prvky (samostatné body v prostoru)  $d_\gamma = 30''$  při pozorování oběma očima a pro monokulární pozorování (pouze jedním okem)  $d_\gamma = 60''$ .

Dosadíme-li do rovnice přesnosti stereoskopického pozorování průměrné hodnoty:  $b_0 = 65 \text{ mm}$ ,  $d_\gamma = 30''$ , získáme následující údaje:

<b>y [m]</b>	0,25	1	10	100	450	1000
<b>d<sub>y</sub></b>	0,14 mm	2,2 mm	0,22 m	22 m	450 m	2240 m

Z toho vyplývá, že schopnost stereoskopického pozorování končí přibližně ve vzdálenosti 450 m od pozorovatele. V reálném prostředí (např. vlivem atmosférických podmínek) končí ještě na kratší vzdálenosti – 250 až 300 m.

### ➤ prostředky pro zlepšení přirozeného stereoskopického vjemu

#### a) rozšíření oční základny

– provádí se pomocí zrcadel nebo hranolů a používá se u binokulárních dalekohledů (triedry) v turistice, lovectví nebo vojenství; extrémního rozšíření oční základny se využívá při pozorování objektů na moři v námořní plavbě (zlepšuje se odhad vzdálenosti a schopnost určit, zda se předměty vzdalují nebo přibližují).

Potom **specifická plastika**  $n = \frac{b}{b_0}$  udává, kolikrát byla zvětšena oční základna a současně také, kolikrát se zlepšil stereoskopický vjem.

#### b) zvětšení ostrosti vidění

– **optickým zvětšením**  $v$  dochází ke zlepšení rozlišovací schopnosti očí; nejmenší možné změně konvergenčního úhlu  $d_\gamma$  odpovídají menší vzdálenosti na pozorovaném objektu (předmět se přiblíží a zvětší).

**Totální plastika** je součin specifické plastiky a optického zvětšení  $n \cdot v$ ; udává, kolikrát se celkově zlepši přesnost stereoskopického pozorování při použití rozšíření oční základny i zlepšení ostroty vidění.



➤ **umělé stereoskopické vidění**

Pro vyvolání *umělého stereoskopického vjemu*:

- a) potřebujeme dva snímky pořízené za těchto podmínek:
- osy záběru musí být rovnoběžné
  - na snímcích je zjištělná **horizontální paralaxa**  $p = x' - x'' \neq 0$ ; snímky jsou pořízeny ze dvou různých míst (tzn. z levého a pravého stanoviska fotogrammetrické základny)
  - nesmí nastat **vertikální paralaxa**  $q = z' - z'' = 0$  resp.  $q = y' - y'' = 0$ ; aby byla její velikost co nejmenší, musí být v případě pozemní fotogrammetrie objektivy na obou koncích základny přibližně ve stejné výšce.



Horizontální paralaxu při vyhodnocení snímků měříme a vertikální paralaxu pro zachování stereoskopického vjemu odstraňujeme.

- b) snímky pozorujeme odděleně – levý snímek levým okem, pravý pravým <sup>2</sup>  
 c) snímky musí být správně orientovány – během relativní orientace obnovujeme vzájemné postavení snímků, jaké bylo při jejich pořízení <sup>3</sup>

<sup>2</sup> Všechny dále uváděné technologie pro vyvolání umělého stereoskopického vidění řeší různým způsobem právě tuto podmínku.

<sup>3</sup> Snímky pokládáme překrytovou částí k sobě. Správnou orientaci je možné určit také podle vržených stínů.

Po splnění těchto podmínek nastává v překrytovém území **normální stereoskopický vjem**.

Další možné stereoskopické vjemy:

- **pseudoskopický vjem** vznikne opačnou orientací snímků, tj. jejich otočením o  $180^\circ$  – prostorová souřadnice potom nabývá opačných hodnot. Využívá se v letecké fotogrammetrii pro kontrolu vyhodnocení výškopisu v rovinatém terénu.
- **nulový vjem** vznikne otočením snímků o  $90^\circ$  – nevidíme plasticky. Z vertikální paralaxy se stává horizontální a může být měřena. Používá se při měření malých rozdílů ve vertikálním směru pro vědecké účely.

➤ **prostředky pro vyvolání umělého stereoskopického vjemu**

Nejjednodušší způsob vyvolání stereoskopického vjemu (bez jakýchkoli pomůcek) je pozorování dvou snímků (obecně jakýchkoli dvou vhodných obrazů) ze vzdálenosti 25 cm od očí, kdy středy snímků jsou vzdáleny na délku oční základny. Přitom nejdlehlší body nesmí být vzdáleny více než 65 mm a maximální horizontální paralaxa je 40 až 50 mm.

Pozorujeme-li tyto řádky stereoskopicky, zdá se nám, že je každý jinak od nás vzdálen.	Pozorujeme-li tyto řádky stereoskopicky, zdá se nám, že je každý jinak od nás vzdálen.
----------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------

Počáteční problémy činí potřeba docílit akomodace na blízký předmět a zároveň konvergence na předmět vzdálený (zaostření na blízko a téměř rovnoběžné oční osy).

Tyto obtíže odstraňují **stereoskopy**:

- **čočkový**: před oči umístíme silné lupy, přičemž středy snímků musí být na vzdálenost oční základny, která se nerozšiřuje,
- **zrcadlový**: oční základna se rozšiřuje zrcadly a zároveň využíváme zvětšení obrazů pomocí čoček (rozšíření oční základny také umožňuje pozorovat snímky větších formátů),
- **hranolový**: oční základna se rozšiřuje pomocí optických hranolů; používají se jako součást větších vyhodnocovacích přístrojů

Čočko-zrcadlové stereoskopy se používají jako samostatná zařízení pro jednoduché metody vyhodnocení letecké fotogrammetrie (např. *Stereometr Zeiss*).



Při pozorování snímků stereoskopem, používáme k měření *stereomikrometr* (z měřených hodnot s odhadem na  $0,01\text{ mm}$  lze vypočítat rozdíly horizontálních paralax).

Zrcadlové stereoskopy se využívají i u menších digitálních fotogrammetrických stanic (např. DVP-Leica, VSD-UGH Krakow) pro stereoskopické pozorování dvojice snímků na monitoru počítače – v těchto případech se často nazývají sklopné stereoskopy.

Následující technologie a systémy pro vyvolání umělého stereoskopického vjemu se liší způsoby oddělení obrazu pro levé a pravé oko: <sup>4</sup>

- **Anaglyfy** – snímky zobrazíme v doplňkových barvách (např. červené a zelenomodré) a pozorujeme je brýlemi se stejně zbarvenými skly (barevnými filtry). Tímto způsobem je umožněno oddělené vnímání dvou vytištěných (případně i v soutisku s mírným posunem), promítnutých nebo na monitoru počítače zobrazených obrazů.

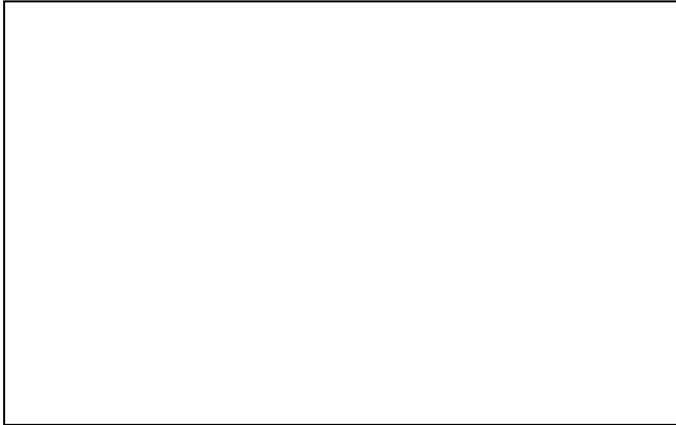
Stereovjem je jednoduchý a levný, ale není příliš kvalitní (např. není možné docílit dobrého barevného podání). Výhodou je možnost pozorování více osobami.



<sup>4</sup> Levé oko vidí pouze levý snímek a pravé oko pouze pravý snímek.

- **Krystalové brýle** (pro CRT monitory) – na monitoru je střídavě zobrazován levý a pravý snímek. Ve shodě s tím (pomocí infračerveného přenosu) je v brýlích se skly s tekutými krystaly střídavě cloněno levé a pravé oko a tím je umožněno oddělené pozorování obou snímků. Je-li frekvence střídání dostatečně vysoká (minimálně 25 Hz jako u klasického filmu), dojde ke splynutí obou obrazů v jeden prostorový model. Moderní systémy používají zobrazování každého snímku 60x za sekundu, tzn. monitory s obnovovací frekvencí 120 Hz. Z tohoto důvodu je nutné používat monitory CRT (*Cathode Ray Tube*).

Brýle jsou drahé, větší a potřebují zdroj elektrické energie – aktivní.<sup>5</sup>



- **Polarizační brýle a polarizační filtr** (pro CRT monitory) – na monitoru se střídavě zobrazují levý a pravý snímek. Ve shodě s tím se mění i polarizace filtru umístěného před monitorem. Pro oddělení obrazů pro levé a pravé oko musejí být polarizační roviny na sebe kolmé – horizontálně a vertikálně polarizované světlo. Při dostatečné frekvenci střídání obrazů a pozorování brýlemi s horizontálně a vertikálně polarizujícími filtry vzniká stereoskopický vjem.

Brýle jsou levné, lehké a nepotřebují zdroj elektrické energie – pasivní.



Podobného principu se využívá při současném (nebo odděleném) promítání obou obrazů přes polarizační filtry (např. v kinematografii – tzv. 3D kina).

<sup>5</sup> Na podobném principu pracoval starší typ brýlí s mechanickými rotačními clonami, které ale byly dosti těžké a jejich použití problematické.

- **Polarizační brýle a polopropustné polarizační zrcadlo** (pro LCD monitory) – dva monitory jsou umístěny nad sebou v úhlu cca  $110^\circ$ . V jejich ose je vloženo polopropustné zrcadlo, které zároveň působí jako vertikálně polarizující filtr. Na horním monitoru se neustále zobrazuje pravý snímek a jeho obraz se při odrazu od zrcadla horizontálně polarizuje. Na spodním monitoru se neustále zobrazuje levý snímek, jehož obraz se při průchodu zrcadlem polarizuje vertikálně.

Používají se brýle s polarizačními filtry jako v předchozím případě (na pravém oku s horizontální polarizací, na levém oku s vertikální polarizací). Odpadá potřeba střídání dvou obrazů na jednom monitoru, proto je možné použít ploché monitory LCD (*Liquid Crystal Display*).



Existují i další technologie pro prostorové zobrazování bez brýlí (např. holografie nebo lentikulární obrazy s lineárními čočkami), které se ale ve fotogrammetrii nepoužívají.

### 3. Pozemní fotogrammetrie

#### 3.1. Charakteristika pozemní fotogrammetrie – metody a využití

Nepohyblivé stanovisko leží na zemi, osa záběru je většinou vodorovná, předměty měření mají velké převýšení na malé ploše. Zachycujeme okamžitý stav s minimální dobou zaměření v terénu. Lze použít i pro obtížně přístupné nebo zdraví škodlivé prostory.

##### ➤ Metody:

- podle počtu snímků: jednosnímková, dvousnímková a průseková
- podle vyhodnocení:
  - a) grafické
  - b) analogové vyhodnocení – mechanicky nebo početně (semianalytické)
  - c) analytické vyhodnocení – početně nebo na analytickém stroji
  - d) obecné početní (pro obecně orientované snímky)
  - e) digitální (zpracování digitálních snímků na počítači)
- podle směru os záběru rozlišujeme:
  - a) pro orientační úhel  $\varphi$ : *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  $\omega$ : *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 <sup>1</sup>	nevhodné <sup>2</sup>

##### ➤ 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 a metoda časové základny

<sup>1</sup> Pokud má být použito stereoskopické vyhodnocení, musí být zachována rovnoběžnost os záběru.

<sup>2</sup> Vlivem rozbíhajících se os záběru se zmenšuje společná (překrytová) část snímků.

### 3.2. Postup prací v pozemní fotogrammetrii <sup>1</sup>

#### 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, na střechách, apod.)

Na zvolené metodě závisí počet snímků pořízených v terénu, orientace jejich os záběru (potřeba přesného určení prvků vnější orientace) a typ použité komory.

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

**c)** volba vhodného typu měřické komory

- měřická, semiměřická nebo neměřická komora (podle zvolené metody, požadované přesnosti a vzdálenosti objektů) – prvky vnitřní orientace jsou buď známé od výrobce, dodatečně určené kalibrací nebo neznámé hodnoty
- velikost konstanty komory (pro práce vyšší přesnosti a na větší vzdálenosti delší konstanta komory – tzn. menší obrazový úhel; pro větší objekty a krátké vzdálenosti, menší konstanta – tzn. větší obrazový úhel, např. při omezeném prostoru před objektem)
- formát klasického snímku nebo rozměr a rozlišení snímku digitálního

<sup>1</sup> 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. 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* – 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* – vzniká perspektivou nezkreslený 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)

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  $m_y$ .<sup>2</sup> Se zmenšující se základnou klesá přesnost vyhodnocení především pro vzdálené předměty.

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 obrazů vytvořit umělý stereoskopický vjem.

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  $y_{stř}$ .

<sup>2</sup> 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:  $b_{\min} = y_{\max} \cdot \frac{1000}{1} \cdot \frac{0,01}{f \text{ [mm]}} = y_{\max} \cdot \frac{10}{f \text{ [mm]}}$ .

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

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

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

Pomocí základnového poměru lze snadno zjistit vhodnou délku základny takto:

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

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

$$\Delta h_{AB} = 1/4 \text{ až } 1/5 \cdot b \quad (\text{tak aby nevznikaly příliš velké vertikální paralaxy})$$

- 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 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  $35^\circ$  nebo volíme libovolnou hodnotu až do  $50^\circ$ )
- překrytové části sousedících základen na sebe musí navazovat
- určení množství potřebného fotografického materiálu (tj. počtu snímků)
- volba způsobu zaměření vlíčovacích bodů
- vyhotovení situačního náčrtu (rozmístění stanovisek a základen, směry os záběru, schematický zákres zaměřovaného objektu nebo terénu a následně též umístění vlíčovacích bodů)



**b) volba a signalizace vlíčovacích bodů**

- vždy volíme 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  $\varphi$  (přesnost na 0,01<sup>g</sup>),
- zaostření (časté je pevné zaostření měřických komor na  $\infty$ ), 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
- změření délky základny (alespoň dvakrát, s třikrát vyšší relativní přesností, než je požadovaná přesnost vyhodnocení)
- zápis a kontrola všech údajů o pořizovaných snímcích (např. do vhodného formuláře)

**d) geodetické zaměření stanovisek a vlíčovacích bodů**

- zaměření provádíme dvakrát, nezávisle, s dvojnásobnou přesností než je požadovaná přesnost vyhodnocení
- souřadnice určujeme pouze pro levé stanovisko a vlíčovací body
- 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 (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
- 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

### 3.3. Komory pro pozemní fotogrammetrii

Pro pořízení *měřického snímku* používáme měřické komory – **fototeodolity**, které mají známé a neměnné hodnoty prvků *vnitřní orientace* (PVO). Na přesnost jejich konstrukce, kvalitu použitých materiálů a optiky jsou kladeny vysoké nároky.

Pro nastavení nebo změření 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  $\varphi$ ). K další výbavě komory patří také stativy a trojpodstavcová souprava.

Fototeodolit = fotografická komora + orientační soustava

- **fotografická komora:**  
objektiv (radiální distorze  $\Delta r' \leq 10 \mu m$ ), tělo komory (pevné, tvarově stálé), značkový rám (v zadní části komory), kazeta na fotografický materiál
- **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 komora 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  $45-50^\circ$  (tj. velkou konstantou komory),  
 $f(13x18) > 210 \text{ mm}$ ,  $\Delta r' = 2-3 \mu m$
  - s normálním obrazovým úhlem  $60^\circ$ ,  
 $f(13x18) = 150-210 \text{ mm}$ ,  $\Delta r' = 3-4 \mu m$ , označení např. **Tessar**<sup>1</sup>
  - širokoúhlé – obrazový úhel  $90^\circ$ ,  
 $f(13x18) = 110-150 \text{ mm}$ ,  $\Delta r' = 2-6 \mu m$ , označení např. **Lamegon**
  - zvláště širokoúhlé – obrazový úhel  $120^\circ$ ,  
 $f(13x18) < 110 \text{ mm}$ ,  $\Delta r' = \text{až } 10 \mu m$ , označení např. **Super Lamegon**

<sup>1</sup> Ohnisková vzdálenost, resp. konstanta komory normálního objektivu přibližně odpovídá úhlopříčce formátu snímku.

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

Dalšími typy komor jsou **speciální** nebo **réseau** (semiměřické) komory.

### A/ Jednotlivé 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 13x18 cm pouze na skleněných deskách (lze je těžko skenovat),
- objektiv posuvný ve vertikálním směru po 5mm (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,

- objektiv není výměnný, vyměňuje se celá fotografická komora v závěsu,
- snímek může být pomocí dvou párů čepů orientován na výšku i na šířku,
- 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,
- zaostřování na výrobcem nastavené 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) a vertikální (svislá osa záběru – pseudoletecká fotogrammetrie)

## B/ Digitální měřické komory

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  $1-2 \mu\text{m}$ , je v pozemní fotogrammetrii řešen dvěma způsoby: postupným snímáním obrazu 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.  $165 \text{ Mp}$ ) 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  $200 \text{ MB}$  dat,
- 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.  $20 \text{ Mp}$ ) je skenován jednou maticí CCD ( $768 \times 581 \text{ pix}$ ),
- v obraze síť křížků po  $1 \text{ mm}$ ,
- využití v průmyslu na kratší vzdálenosti (sledování obrábění, kalibrace robotů, určování deformací, atd.)

#### ➤ *JenScan 4500MC*

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

### - velké CCD čipy (senzory) <sup>2</sup>

#### ➤ *ICAM 28 a ICAM 6 (Philips)*

- velké CCD čipy:  $86 \times 50 \text{ mm}$ , tj.  $7168 \times 4096 \text{ pix}$  ( $29 \text{ Mp}$ ) nebo menší varianta  $3072 \times 2048 \text{ pix}$  ( $6 \text{ Mp}$ ), čidla jsou uspořádána do matic s přesností  $1 \mu\text{m}$
- aplikace v pozemní fotogrammetrii

#### ➤ *Q16 MetricCamera* <sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> V profesionální (ateliérové) fotografii se používají fotoaparáty se senzory většími, než jaké jsou používané ve fotogrammetrii. Nesplňují ale podmínku geometrické přesnosti  $1-2 \mu\text{m}$  uspořádání čidel v matici do řádek a sloupců. Jsou to například výrobky firmy *Leica* (senzor  $45 \times 30 \text{ mm}$ , tj.  $37 \text{ Mp}$ ) nebo *Hasselblad* ( $5412 \times 7212 \text{ pix}$ , tj.  $39 \text{ Mp}$  nebo senzor  $36,8 \times 49,1 \text{ mm}$ ,  $6132 \times 8178 \text{ pix}$ , tj.  $50 \text{ Mp}$ ).

<sup>3</sup> Dalšími typy digitálních semiměřických komor značky *RolleiMetric* jsou *Rolleiflex 6008 AF digital metric* s digitální stěnou *PhaseOne* s  $16, 22$  až  $39 \text{ Mp}$  a komory řady *d7, d30* a *d507 metric* se  $4,8 \text{ Mp}$ .

### C/ Dvojité komory

Používaly se pro blízkou stereofotogrammetrii. Dnes jsou ve svých původních oblastech využití nahrazeny semiměřickými réseau komorami a průsekovou fotogrammetrií.<sup>4</sup> Dělí se do dvou skupin podle dosažitelné přesnosti:

#### - I. řádu (přesnější)

##### ➤ *IMK 10/1318*

- nepřenositelná, určená pro využití v průmyslu (velmi blízká fotogrammetrie),
- plynule měnitelná délka základny (35-160 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 ( $\varphi = 0$ ),
- $f_k = 56$  mm,  
širokoúhlý objektiv velkého průměru s pevným zaostřením (4 nebo 8 m),
- desky  $9 \times 12$  cm s rozměrem vlastního snímku  $8 \times 8$  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  $15^\circ$ ) až do zenitu i nadiru,
- speciální masivní stativ s výsuvnou tyčí,
- využití pro dokumentaci památkových objektů (především vnitřní prostory) a větších dopravních nehod

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

### D/ Réseau komory<sup>5</sup>

Jsou to upravené profesionální zrcadlovky – patří mezi *semiměřické komory*. Hodnota konstanty komory  $f_k$  a průběh radiální distorze  $\Delta r'$  (dosahuje až  $200 \mu\text{m}$ ) jsou uvedeny v kalibračním protokolu od výrobce. 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 skenováním digitalizovaného snímku odstranit vliv srážky.

<sup>4</sup> Metoda je odlišná, ale stejné jsou oblasti využití: dokumentace menších stavebních objektů na kratší vzdálenosti nebo dokumentace rozsáhlejších dopravních nehod.

<sup>5</sup> Slovo *réseau* [rezo] je z francouzštiny a znamená *mřížka*.



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)**<sup>6</sup>
  - komory s výměnnými objektivy,
  - snímky se pořizují na svitkový film (jedno políčko  $6 \times 6 \text{ cm}$ ),
  - v ploše snímku síť  $11 \times 11 = 121$  křížků (po  $5 \text{ mm}$ ) pro typ *6006*, resp.  $23 \times 31 = 713$  křížků pro typ *6008*,
  - komora má také svoji digitální variantu (viz. str. 68, poznámka 3)
- **Rolleiflex 3003 metric (RolleiMetric)**
  - snímky se pořizují na kinofilm (jedno políčko  $24 \times 36 \text{ mm}$ ),
  - v ploše snímku síť  $5 \times 7 = 35$  křížků (po  $5 \text{ mm}$ ),
  - používá se pro práce menší přesnosti
- Další výrobci: *Leica, Nikon, Pentax, Phidias*

## E/ 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 1.000.000 snímků za vteřinu
- **panoramatické komory**
  - používají se komory s rotujícím objektivem a záznamem obrazu na film (přimknutý k zakřivené ploše) nebo na řádkou čidel při digitálním snímání,<sup>7</sup>
  - úhel záběru je až  $360^\circ$

<sup>6</sup> V roce 2008 koupila stoprocentní podíl ve firmě *RolleiMetric* společnost *Trimble*.

<sup>7</sup> Objektivy typu „rybí oko“ s úhlem záběru  $180^\circ$  nejsou pro použití ve fotogrammetrii vhodné – mají obrovská zkreslení.

➤ **videoteodolity a videokomory**

- *videoteodolity* jsou totální stanice se zabudovanými CCD kamerami případně doplněné také přijímačem GNSS,
- pro každý snímek obrazového záznamu jsou uloženy přesně měřené prvky vnější orientace (odpadá potřeba vlíčovacích bodů);
- *videokomory* se využívají především pro zaměření liniových staveb podél dráhy pohyblivého nosiče (nejčastěji automobilu),
- nutné je průběžné měření a záznam prvků vnější orientace,
- při kontinuálním snímání obrazu vzniká velké množství dat (z 1 minuty záznamu senzorem CCD  $800 \times 600 \text{ pix}$  vzniká cca 1GB dat)

**F/ Neměřické komory (fotoaparáty)**

Pro analytické metody blízké a velmi blízké fotogrammetrie nižší přesnosti (do cca  $15 \text{ m}$ ) je možné použít kvalitní poloprofesionální a profesionální fotoaparáty na svitkový film ( $6 \times 6 \text{ cm}$ ), kinofilm ( $24 \times 36 \text{ mm}$ ) nebo digitální zrcadlovky s kvalitními výměnnými objektivy ( $\Delta r'$  na okrajích snímku překračuje hodnotu  $200 \mu\text{m}$  a může dosáhnout až  $1 \text{ mm}$ ). Z tohoto důvodu využíváme pro měření jen oblast kolem středu snímku (cca 60%).

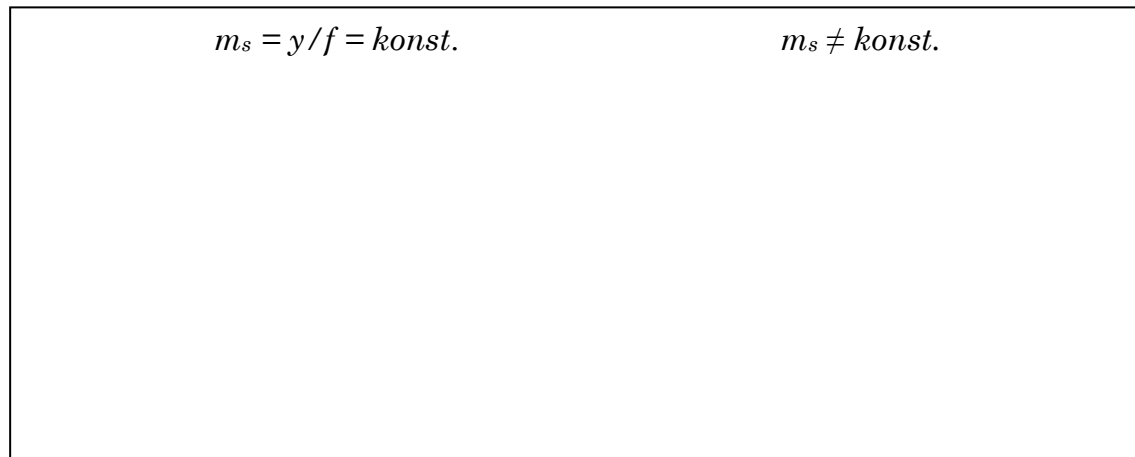
Systém snímkových souřadnic je definován rohy snímku. Prvky vnitřní orientace nejsou známy a určujeme je většinou dodatečně při vyhodnocení snímků výpočtem z dostatečného množství vlíčovacích bodů pomocí DLT transformace (min. 6 VB).

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 velikost 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* (viz. str. 68, poznámka 2).

### 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 různé body na snímku různé měřítko a vzniká tak perspektivní obraz (rovnoběžky se sbíhají).



Tato zkreslení je možné odstranit metodou jednosnímkové fotogrammetrie – **překreslením snímku** (rovnoběžnost přímek je obnovena, zobrazení je v požadovaném měřítku a není stranově a výškově převrácené).<sup>1</sup>

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:



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

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

$\Delta y$  – velikost výstupku,  $\Delta r$  – 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 fotoplánu,  
 $m_F$  – měřítkové číslo fotoplánu

<sup>1</sup> 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  $\Delta y$ . 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).<sup>2</sup>

### ➤ Pořízení snímků a jejich vyhodnocení

- pro snímkování lze použít analogové i digitální měřické komory (fototeodolity); v současné době jsou to ale především digitální semiměřické (např. *réseau*) a neměřické komory;
- polohu stanoviska a orientaci osy záběru není třeba určovat měřením ani zakreslovat do náčrtu;
- osu záběru volíme pokud možno kolmou k objektu;
- v terénu je třeba zaměřit minimálně 4 vřícovací body ležící v rovině překreslení; běžně ale volíme nadbytečný počet (8-12 bodů); další možností je změřit na objektu alespoň dvě délky (vodorovnou a svislou);
- při vyhodnocení řešíme vztah dvou rovin (středový průmět z roviny na rovinu) – roviny snímku a roviny mapy (fotoplánu);
- pro vztah mezi fofoplánem a snímkem 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**; <sup>3</sup> v současné době se provádí **kolineární transformace rastru** – tj. digitální překreslení snímku na počítačích (pokud nebyly snímky pořizeny jako přímodigitální, jsou digitalizovány druhotně skenováním); transformace mění polohu (souřadnice) jednotlivých pixelů v digitálním obrazu;

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

<sup>3</sup> 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).

- 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 vlíčovací body a překresluje se samostatně;
  - u velkých objektů se plán 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)

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

➤ **metoda světelných řezů**

- používá se pro zaměřování řezů (příčných profilů) chodeb, tunelů, kolektorů, štol a jiných tmavých prostor (např. jeskyní);
- výbava pro snímkování: kříž se zábleskovým zařízením a čtyřmi vlíčovacími 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) vlíčovacích bodů uměle osvětlených během expozice;
- překreslené profily slouží například pro dokumentaci rozvodů inženýrských sítí, výpočet kubatur nebo určování průjezdnosti tunelů

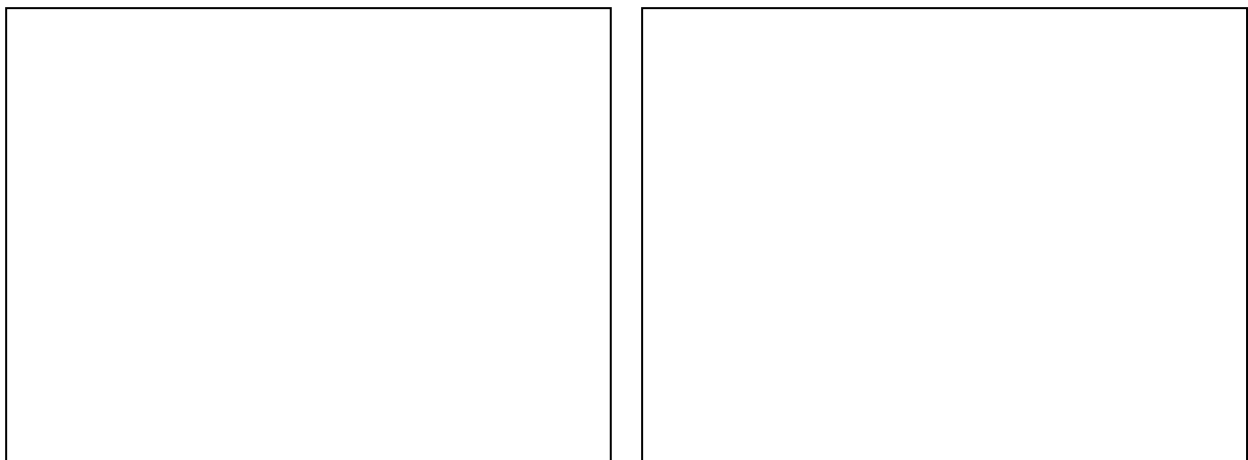
➤ **zákres objektu do snímku**

- 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 metoda znovu objevená s příchodem semiměřických réseau komor, komor digitálních a využitím analytických početních metod vyhodnocení. Původní využití pro mapování nepřístupných horských masivů na vzdálenost několika kilometrů. V současné době 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 (především 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 analytické (obecné početní) vyhodnocení digitálních nebo digitalizovaných snímků na počítačích.



#### ➤ Pořízení snímků a jejich vyhodnocení

- 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) – vyhodnotit je možné bod, který je zobrazen na dvou a více snímcích;
- osy záběrů se protínají přibližně ve středu mapovaného území nebo objektu; snímky se pořizují kolem celého objektu pod různými úhly záběru;
- vhodný úhel protnutí os záběru je dán velikostí základny, tj. vzdáleností mezi stanovisky snímkování ( $b_{min} = y/3$ ); ideální úhel protnutí je  $60-90^\circ$
- pro umístění a orientaci modelu potřebujeme alespoň tři geodeticky zaměřené vřícovací body (nebo alespoň jednu známou délku a směr); vhodnější je nadbytečný počet bodů (4 až cca 8); někdy jsou pro zpracování požadovány také přibližné hodnoty prvků vnější orientace (např. v náčrtu zaznamenaná poloha stanovisek a směr os záběru);
- vyhodnocení: dříve grafické, dnes analytické (obecné početní) řešení na PC využívající prostorovou projektivní transformaci nebo DLT – direktní lineární transformaci (pro snímky s neznámými PVO, např. neměřické snímky,

v tom případě je nutné zaměřit min. 6 VB); používáme přímý vztah mezi snímkovými a geodetickými souřadnicemi;

- možné je pouze bodové vyhodnocení – vyhodnocované body je nutné vyhledat a označit na min. dvou snímcích; body musejí být dobře přirozeně signalizované (body bez přirozené signalizace nelze na snímcích jednoznačně rozpoznat a vyhodnotit – jejich identifikace je bez stereoskopického vjemu obtížná); případně je možné použít umělou signalizaci – samolepícími terčíky nebo světelnou stopou;
- získáme prostorové geodetické souřadnice jednotlivých bodů [X, Y, Z]

➤ **Postup 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 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 – prvky vnější orientace)

Souřadnice stanovisek se počítají ze 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 vektorovou kresbu

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-STARs 3D* (Geodetic Systems, USA), *Insight 3d* (Analytical Graphics, USA), *iWitness* (Photometrix, Austrálie)

### 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*  $50^\circ$ ). 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  $500 \text{ m}$ .



### ➤ 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:<sup>1</sup>

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

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

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

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

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

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

<sup>1</sup> 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  $\varphi$ .



Pro **základnu normálního případu** by platila rovnice  $\bar{b} = b \cdot \cos \varphi$ , pokud by střed vstupní pupily ležel přímo nad stanoviskem základny (v točné ose měřické komory).

Pokud ale střed vstupní pupily neleží nad stanoviskem a je posunutý o délku *excentricity středu vstupní pupily* ve směru osy záběru, objeví se v rovnici druhý člen:

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

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  $1$   $\mu$ 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  $\varphi$  (orientace a rovnoběžnosti os záběru), nepřesným nastavením úhlů  $\omega$ ,  $\kappa$  (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).<sup>2</sup>
  - a) **relativní orientace**
    - 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  $\kappa$  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*;

<sup>2</sup> Pokud mají být ze souřadnic stanoviska komory vypočteny geodetické souřadnice středu vstupní pupily, je třeba znát také *excentricitu vstupní pupily* – tj. vodorovnou vzdálenost mezi točnou osou měřické komory a bodem  $O$ .

- 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 <sup>3</sup>

#### 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 do roviny 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*.

<sup>3</sup> Některé metody je možné použít i pro průsekovou fotogrammetrii.

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

Původně je 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 *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)

K výslednímu **plánu** nebo **mapě** přikládáme technickou zprávu, seznamy souřadnic vlíčovacích a podrobných bodů, situační náčrt (schéma terénu nebo objektu, rozložení základěn a orientace os záběru, umístění vlíčovacích bodů), detaily vlíčovacích bodů a kontaktní kopie nebo zvětšeniny 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. 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 fotogrammetrii <sup>1</sup>

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, <sup>2</sup> kdy byly nahrazeny analogovými stroji a později digitálními metodami vyhodnocení; prakticky po dobu 80-ti 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 využívají dvou ručních kol (souřadnice  $x$ ,  $y$ ) a jeden nožní kotouč (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) <sup>3</sup>  
určen pro zpracování snímků z komory *PhoTheo 19/1318*;  
maximální rozměr snímků  $13 \times 18$  cm (pouze na skle),  $f = 157 - 198$  mm;  
výsledkem vyhodnocení je originál mapy vznikající přímo 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  $23 \times 23$  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.

<sup>1</sup> Většina uvedené přístrojové techniky je určena pro metody dvousnímkové fotogrammetrie.

<sup>2</sup> 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**.

<sup>3</sup> 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 zde 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;<sup>4</sup>  
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 nožními kotouči pro paralaxy;  
umožňuje přímý výstup měřených hodnot do počítače

<sup>4</sup> 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**



Interpolací naměřeného proudu 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 hodnoty z hodnot sousedních pixelů

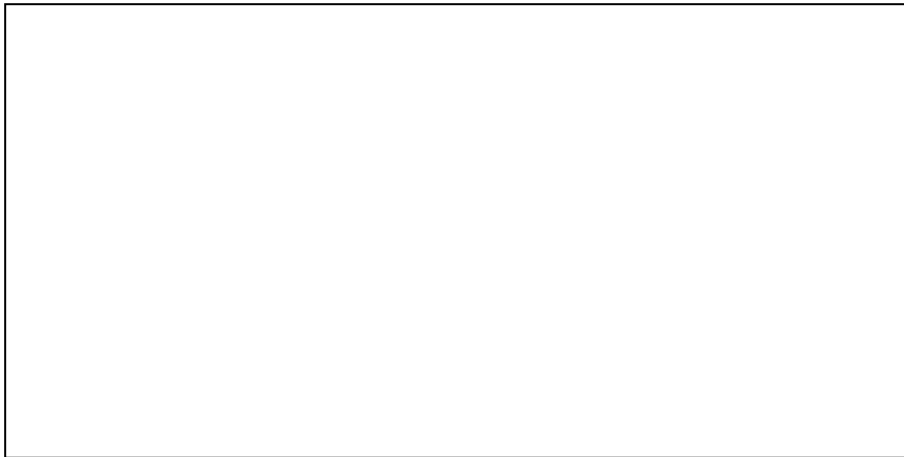
➤ **analytické stroje (Analytical Plotters)**

patent finského vědce a fotogrammetra *Uuno (Uki) Vilho Helava*<sup>5</sup> existuje již od roku 1956, první konstrukce s označením AP/C vznikla v 1964; výroba a rozšíření analytických strojů ale bylo znemožněno nedostatečnou kapacitou tehdejší výpočetní techniky;  
k jejich praktickému uplatnění došlo až v průběhu 70. a v 80. letech 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

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

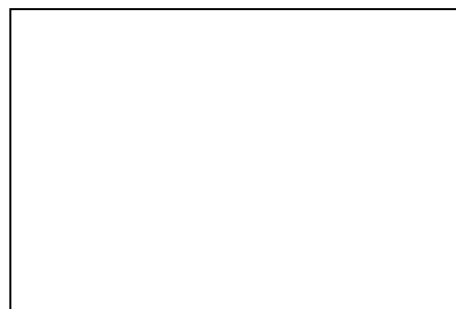


Skládá se ze dvou základních částí: přesného stereokomparátoru a počítače.



Pohyb snímků je ovládán nepřímo – zprostředkovaně přes počítač: pomocí stereoskopu pozoruje oba snímky a v prostorovém modelu se pohybujeme pomocí dvou ručních kol a nožního kotouče (nebo pohybem fotogrammetrické myši s točítkem po tabletu). Otáčení ovládacích prvků je zachyceno pomocí **rotačních snímačů impulsů** a přenášeno 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 impulsů** a zjištěné snímkové souřadnice jsou porovnávány s požadovanými hodnotami. Tento cyklus se opakuje alespoň *50x* za vteřinu, takže vyhodnocovatel má dojem přímého ovládání měřické značky – výpočty musí probíhat v reálním čase (je řešena soustava čtyř rovnic). Naměřené snímkové souřadnice jsou okamžitě převáděny do geodetického systému, takže výstupem je skutečný tvar, velikost a poloha vyhodnocovaných objektů.

**Rotační snímač impulsů** se skládá ze skleněného kotoučku s neprůsvitnými značkami na obvodu, umístěného na ose ovládacího prvku, zdroje světla (laserová dioda) a čidla (fotodioda), 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 až *24x24 cm*;  
přesnost ve snímkových souřadnicích *2 μm*
- **Planicomp P3 (Opton – Zeiss)**  
konstruován na základě přesného stereokomparátoru *PK-1* s lineárními snímači impulsů;  
přesnost ve snímkových souřadnicích *1 μm*

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

➤ **digitální fotogrammetrická pracoviště**

**DPW – Digital Photogrammetric Workstation**

Digitální nebo skenováním digitalizované stereoskopické snímky i snímky průsekové (silně konvergentní) se vyhodnocují na **digitálních stereoskopických pracovištích** (stanicích). Základní součástí je výkonný počítač s **hardwarovými doplňky pro stereoidění** (krystalové nebo polarizační brýle) většinou vybavený dvěma monitory (pro uživatelské rozhraní ovládacího software a 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 také 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 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)** <sup>7</sup>

➤ **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.

<sup>6</sup> V ČR byly tyto stroje rozšířeny v 90. letech 20. století díky programu FARE.

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

## 4. Letecká fotogrammetrie

### 4.1. Charakteristika letecké fotogrammetrie – metody a využití

Během snímkového letu je možné určit polohu pohybující se komory (středu vstupní pupily) pouze přibližně. Osa záběru je většinou udržována ve svislé poloze.<sup>1</sup> Využití leteckých metod je vhodné pro mapování větších území (cca od 5 km<sup>2</sup>), a také v nepřístupných nebo živelní pohromou postižených oblastech (povodně, polomy, apod.). Výhodou je bezkontaktní měření, krátká doba sběru dat, okamžité zachycení aktuálního stavu a možnost opakovaného (periodického) snímkování.

Letecká fotogrammetrie je hlavní mapovací metodou pro mapy středních měřítek (doplňkovou metodou je pozemní fotogrammetrie), ale může být využívána i pro mapování ve velkých měřítkách. Krom základních map mohou být z leteckých snímků vyhotovovány i mapy tématické a účelové (např. lesnické nebo železniční). Další oblastmi využití jsou: vyhotovení mapových podkladů pro projekty velkých staveb (dálnic, přehrad apod.), zaměření liniových staveb a povodí vodních toků. Také je jedním z hlavních dodavatelů geograficky lokalizovaných dat pro GIS – geografické informační systémy. Nečastějším produktem letecké fotogrammetrie je v současné době digitální ortofoto a DMT – digitální modely terénu.

#### ➤ metody jednosnímkové letecké fotogrammetrie

##### a) grafické metody vyhodnocení

- proužková metoda
- metoda projektivních sítí (pravidelné a nepravidelné sítě)

##### b) opticko-grafické metody – obkreslování snímku

##### c) opticko-mechanické metody – překreslování snímku

##### d) kolineární rovinná transformace rastru – digitální překreslení snímku

#### ➤ metody dvousnímkové letecké fotogrammetrie (stereofotogrammetrie)

##### a) jednoduché metody vyhodnocení

##### b) přibližné metody vyhodnocení

##### c) přesné metody vyhodnocení

- analogové – mechanicky
- analogové – početně (semianalytické)
- analytické – početně
- analytické – na analytických strojích
- digitální

<sup>1</sup> Moderní technologie umožňují využít v letecké fotogrammetrii i šikmé snímky; většinou v kombinaci se snímky svislými.

**Průseková fotogrammetrie** se jako letecká metoda používá jen výjimečně, a to z nízkých letových hladin – několik desítek až několik set metrů. Snímkuje se z vrtulníku nebo malého letadla (případně z řízeného modelu), např. pro dokumentaci rozsáhlých dopravních nehod, větších (historických) budov, archeologických nalezišť nebo zaměření skalních masivů.

➤ **digitální ortofoto a tvorba DMT – digitálního modelu terénu**

a) v daném území existuje DMT – **tvorba ortofota** *prostorovou projektivní transformací rastru*

b) v daném území neexistuje DMT – **tvorba digitálního modelu terénu**

- metodou analytického mapování s poloautomatickým sběrem dat
- automatická tvorba DMT na digitálních fotogrammetrických pracovištích (DPW) pomocí obrazové korelace

➤ **snímkové triangulace**

a) *radiální triangulace*

- grafická
- mechanická
- početní

b) *aerotriangulace*

- analogová
- semianalytická
- analytická
  - etapové řešení – blokové vyrovnání
  - komplexní řešení – vyrovnání paprskových svazků
  - komplexní řešení s podporou GPS/IMSU
- digitální aerotriangulace

➤ **metody podrobného fotogrammetrického mapování**  
(mapovací metody)

- **kombinovaná metoda:** polohopis je získán jednosnímkovou leteckou fot. (vzniká fotoplán) a výškopis je doplněn geodeticky (vzniká fotomapa); vhodná pouze pro rovinnaté území, nezarostlý, případně i zastavěný terén;
- **univerzální metoda:** polohopis i výškopis je získáván dvousnímkovou leteckou fot.,<sup>2</sup> vhodná i pro členitý (také horský) ale nezarostlý terén;
- **integrovaná metoda:** polohopis vytvořen diferenciálním překreslením snímku (na diferenciálním překreslovači) převedením středového průmětu snímku na pravouhlý průmět mapy; po připojení dalších zařízení případně i s výškopisem;<sup>3</sup> vhodná také pro zvlněný terén; historická metoda, v současné době nahrazena na stejném principu založenou metodou *digitálního ortofota*

<sup>2</sup> Do měřítka mapy 1: 10 000 grafické vyhodnocení, pro měřítka 1: 5000 a větší číselné – bodové vyhodnocení.

<sup>3</sup> Vzniká model terénu ve formě segmentů vrstevnic a profilových čar – šířka čáry značí určitou výšku.

## 4.2. Příprava a provedení snímkového letu

### ➤ Historický vývoj

Počátky leteckého měřického snímkování na území ČR sahají do období první republiky:

- 1919 - založen Vojenský zeměpisný ústav (VZÚ)
- 1922 - zřízeno fotogrammetrické oddělení (první v ČSR)
- 1927 - vzniká fotoletecká skupina a jsou pořízeny první letecké měřické snímky řadovou komorou
- 1936 - snímkováno celé území ČR (snímky jsou dnes uloženy v archivu VGHMÚř)

Další vývoj byl přerušen druhou světovou válkou a fotogrammetrické mapovací pokračovaly až po roce 1948:

- 1951 - VZÚ rozdělen na tři instituce: Vojenský zeměpisný ústav Praha, Vojenský topografický ústav Dobruška (VTOPÚ - fotogrammetrické oddělení) a Vojenský kartografický ústav Harmanec (nyní ve Slovenské republice)<sup>1</sup>

#### - Vojenské topografické mapování 1953-1957:

hlavní mapovací metodou byla letecká fotogrammetrie; vzniká topografická mapa 1:25 000 **TM 25**; aktualizována dodnes Geografickou službou armády ČR v Dobrušce (**GeoSI AČR** - fotogrammetrické oddělení); dále vznikly odvozené mapy menšího měřítka **TM 50** a **TM 100**,<sup>2</sup> v současné době jsou tyto mapy převedeny do zobrazení UTM a souřadnicového systému WGS84 pro účely NATO; TM 50 je také nově vydávána jako turistická mapa

- 1954 - vzniká Ústřední správa geodézie a kartografie (ÚSGK);<sup>3</sup> dochází ke sjednocení civilní geodetické a kartografické služby; v čele stojí předseda jmenovaný vládou republiky; vznikají celostátní nebo oblastní ústavy (pro jeden a více krajů); jejich součástí jsou Okresní měřická střediska (OMS); od 1.7. 1960 Střediska geodézie (SG)

#### - Společné topografické mapování 1957-1968/71:

spolupráce ÚSGK a Vojenské topografické služby; hlavní mapovací metodou je letecká fotogrammetrie: univerzální (74%) a kombinovaná metoda (10%); v rovinném a zalesněném terénu: tachymetrie (8%), revizí existujících map (8%); vzniká topografická mapa 1:10 000 **TM 10**;<sup>2</sup> mapy v tomto měřítku již armáda v současné době nepoužívá, ale po roce 1968 byly upraveny pro civilní sektor (viz. následující odstavec)

<sup>1</sup> Všechny tři vojenské ústavy zanikly v roce 2003 a nástupnickou organizací se stal Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad v Dobrušce u Hradce Králové – VGHMÚř.

<sup>2</sup> S-42, Gauss-Krügerovo zobrazení

<sup>3</sup> Zřízena vládním nařízením č.1/1954 Sb. (nabylo účinnosti 6.1. 1954).

– **Civilní topografické mapy po roce 1968:**

rozhodnuto o utajování výsledků geodetických a kartografických prací; Český úřad geodetický a kartografický (ČÚGaK, dnešní ČÚZK – Český úřad zeměměřický a katastrální) vytváří nové státní mapové dílo ve středním měřítku, odvozením z TM 10 vzniká v letech 1971-1988 **Základní mapa středního měřítka ZM 10** a mapy menšího měřítka ZM 25, ZM 50, ZM 100 a ZM 200<sup>4</sup>

– **THM - Technickohospodářské mapování 1961-81:**

vznikají mapy velkého měřítka 1:2000 (1:1000, 5000),<sup>5</sup> obsahují polohopis i výškopis; zmapováno celkem asi 8,5% území dnešní ČR; PPBP doplňováno fotogrammetricky; podrobné fotogrammetrické mapování extravilánu a venkovské zástavby na územích s rozlohou nejméně 500ha (5km<sup>2</sup>): univerzální a kombinovaná metoda, doměřování zakrytých prostor geodetickými metodami

– **ZMVM - Základní mapa velkého měřítka 1981-1992:**

vznikají mapy velkého měřítka 1:1000 až 1:5000 bez výškopisu;<sup>4</sup> pokrývají asi 16% ČR; fotogrammetricky mapován extravilán a intravilán menšího významu: univerzální metoda (číselné vyhodnocení polohopisu pro 3. třídu přesnosti) a integrovaná metoda (diferenciální překreslení snímků - polohopisný podklad pro 5.třídu př.); vznikají první ortofotomapy; ZMVM byly určeny pro potřeby Evidence nemovitostí

➤ **Současný vývoj**

Do roku 1989 podléhaly všechny letecké snímky utajení. Snímkování prováděl výhradně Vojenský topografický ústav Dobruška (VTOPÚ). Jeho nástupnická organizace **Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad Dobruška** (VGHMÚř) dnes vlastní nejrozsáhlejší archiv leteckých snímků v ČR. Snímkový let pro mapování v civilním sektoru mohl zadávat pouze Geodetický a kartografický podnik v Praze. Po roce 1989 mohou letecké snímkování zadávat a provádět civilní i soukromé firmy.<sup>6</sup> Vznikl tak trh s leteckými a družicovými snímky.

– **vznik ZABAGED - Základní báze geografických dat 1995 - 2002**

1995-2000: prvotní pořízení dat skenováním a vektorizací Základní mapy ČR 1:10 000, od r. 2000 zpřesnění polohy vybraných objektů a první aktualizace s využitím fotogrammetrických metod a místního šetření v terénu; uplatnění ZABAGED při tvorbě a obnově státních mapových děl středních měřítek (ZM); 2000-2002: začíná 1. cyklus tříletého periodického leteckého měřického snímkování (dříve interval obnovy cca 5-7 let), snímkována je vždy třetina území v pásech východ, střed a západ

<sup>4</sup> S-JTSK, Křovákovo zobrazení

<sup>5</sup> 1. etapa (1961-1968): S-42, Gauss-Krügerovo zobrazení; 2. etapa (1969-1981): S-JTSK, Křovákovo zobrazení

<sup>6</sup> V roce 1991 došlo ke snížení stupně utajení leteckých snímků a následně k jeho zrušení.

– od r. 2003 - **barevné snímkování pro tvorbu digitálního ortofota** (dříve převážně černobílé snímky); formát snímků  $23 \times 23 \text{ cm}$  (do cca 60.-70. let převážně  $18 \times 18 \text{ cm}$ ),  $m_s = 23\,000$ ; širokoúhlá komora ( $f = 152 \text{ mm}$ ); výška letu  $h = 3500 \text{ m}$ ; letové osy rovnoběžné s kladem listů státní mapy 1:5000 (SM 5), tj. s osou Y S-JTSK (dříve směr Z-V), podélný překryt  $p = 60 \%$ , příčný překryt  $q = 24,4 \%$ ; prvky vnější orientace měřeny pomocí DGPS a IMU / INS; prováděna signalizace výchozích bodů a digitální (analytická) aerotriangulace – AAT; skenování snímků s rozlišením  $21 \mu\text{m}$  (tj. cca 1200 DPI) a  $0,48 \text{ m GSD}$ ; od r. 2006 rozlišení  $20 \mu\text{m}$  a  $0,46 \text{ m GSD}$  <sup>7</sup>

– vzniká **ortofotomapa** (ortorektifikované a georeferencované měřické snímky, tj. překreslené do pravoúhlého průmětu a souřadnicově připojené) v kladu Státní mapy 1:5000 (SM 5) zobrazující území o velikosti  $2 \times 2,5 \text{ km}$  s rozlišením  $0,5 \text{ m GSD}$ ; letecké snímkování je financováno podle dohody ČÚZK, Ministersva obrany a Ministerstva zemědělství; zpracování na 1/3 území zajišťuje VGHMÚř a na 2/3 území ZÚ (fotogrammetrické oddělení Pardubice); na podkladě ortofota probíhá aktualizace **ZABAGED** <sup>8</sup> a z něj se vytvářejí **Základní mapy středního měřítka** ZM 10, ZM 25, ZM 50 a ZM 100, některé prvky se doměřují analytickými stroji (Leica - SD 2000, 3000) a na DPW - digitálních fotogrammetrických stanicích (BAE Systems - Helava)

– od r. 2010 je využívána **digitální měřická komora** Microsoft - Vexcel UltraCam XP (PAP&spol. Most a BLOM Deutschland) pro současné snímkování v pásmech PAN, R, G, B a NIR; konstanta komory  $f = 100 \text{ mm}$ ,  $1 \text{ CCD} = 6 \mu\text{m}$ , pro výšku letu  $h = 3200 \text{ m}$  a měřítkové číslo snímku  $m_s = 32\,000$  odpovídá  $0,2 \text{ m}$  na terénu; velikost digitálního snímku  $17.310 \times 11.310 \text{ pix}$  zaujímá obrazové pole  $103,9 \times 67,9 \text{ mm}$  (nahradí analogový snímek formátu  $23 \times 15 \text{ cm}$  skenovaný s velikostí 1 prvku CCD  $13 \mu\text{m}$ , tj. s rozlišením  $1950 \text{ DPI}$ ); vzniká ortofoto s rozlišením  $0,25 \text{ m GSD}$

### ➤ Organizace zajišťující letecké měřické snímkování v ČR

– *státní správa:*

Ortofoto, jako součást státního mapového díla, vzniká spoluprací ČÚZK – Českého úřadu zeměměřického a katastrálního a AČR – Armády České republiky. Na tvorbě se podílejí fotogrammetrická oddělení ZÚ – Zeměměřického úřadu v Pardubicích a VGHMÚř – Vojenského geografického a hydrometeorologického úřadu (GeoSI AČR - Geografická služba armády ČR) v Dobrušce. Následně je ortofoto v civilním sektoru používáno pro aktualizaci ZABAGED a z této databáze jsou generovány **Základní mapy středního měřítka** ZM 10, 25, 50, 100. Pro armádní účely k aktualizaci Digitálního modelu území DMÚ 25, 100 a z něj vytvářených **Topografických map** TM 25, 50 a 100. Snímkový let je zadáván formou státní zakázky soukromým firmám.

<sup>7</sup> GSD – Ground Sample Distance; velikost jednoho pixelu na zemském povrchu (např. rozměr prvku CCD v použitém scanneru násobený měřítkovým číslem digitalizovaného snímku).

<sup>8</sup> Aktualizuje se také na podkladě místního šetření v terénu a dat od správců vybraných typů objektů.

– *soukromý sektor:*

*Geodis (Brno)* – vytváří ortofoto od roku 2003 s rozlišením  $0,5\text{ m}$  GSD a od roku 2004 s rozlišením  $0,2\text{ m}$  ze snímků v měřítku 1:20 000, analogové snímky jsou skenovány s rozlišením  $14\ \mu\text{m}$  (tj. 1800 DPI) nebo pořizovány digitální komorou *Microsoft - Vexcel UltraCam X*,

*ArgusGeo (Hradec Králové)* – dceřiná společnost Geodis, disponuje vlastní přístrojovou technikou (např. *Microsoft - Vexcel UltraCam X*) a leteckými nosiči

*Georeál (Plzeň)* – ve spolupráci s francouzskou partnerskou firmou bylo provedeno v roce 2011 snímkování jedné třetiny území ČR digitální měřickou komorou *Microsoft - Vexcel UltraCam XP*

➤ **Podmínky pro letecké měřické snímkování**

Na jeden rok připadá jen asi *20-30 dnů* ideálních pro fotogrammetrické letecké snímkování. Na jaře bývá problém se vzdušnými parami, v létě s vegetacním krytem a na podzim bývá obecně zhoršené počasí, případně již napadne sníh. Snímkové dny jsou voleny podle požadavků zadavatele – pokud má být zachycen průběh terénu, snímkuje se v jarních měsících bez vegetace, pokud má být dokumentována zeleň, provádí se snímkování v letních měsících. Použitím speciálních materiálů (např. infračervených) je možné počet vhodných dnů rozšířit až na *60* v roce. Snímkový den trvá při dobrém počasí cca *6 hodin* – nejvhodnější doba je od 10 do 15 hodiny, kdy nejsou dlouhé vržené stíny.

➤ **Projekt snímkového letu**

Zadavatel, který bude snímkový let objednávat, připravuje **projekt snímkového letu**. Případně lze jeho zpracování zadat jako součást dodávky. Skládá se z písemné a grafické části.

– *Písemná část*

je tvořena vyplněným tiskopisem objednávky a obsahuje:

1. *údaje o objednavateli:* název a adresa organizace, telefonní kontakt, e-mail, bankovní spojení, číslo účtu
2. *technické údaje:* název snímkaného prostoru a jeho rozloha ( $\text{km}^2$ ), požadovaný termín a účel snímkování, měřítko výsledné mapy, směr náletu (nejčastěji směr V-Z), **podélné překryty:** dříve 60% (některé body jsou zobrazeny na 2-3 snímcích), dnes 80% (některé body zobrazené na 4-5 snímcích) – vzniká méně zakrytých prostor, vhodné pro zastavěná území, nevýhodou je kratší základna a menší základnový poměr (b/h), objevuje se potřeba snímkovat z nižších letových hladin v kratším časovém intervalu, **příčné překryty** (20-40%); v jednosnímkové fotogrammetrii oba překryty cca 30%



*Podélný překryt* je společná část dvou po sobě jdoucích snímků vyjádřená v procentech.

*Příčný překryt* je společná část snímků ve dvou sousedních řadách vyjádřená v procentech.



Další číselné údaje:

a) **měřítkové číslo snímku** – určuje se dvojitým způsobem:

– vzhledem k hospodárnosti (co největší číslo, tj. menší měřítko)

$$m_s = k \cdot \sqrt{m_m}$$

$k$  – koeficient hospodárnosti (200-300),  $m_m$  – měřítkové číslo výsledné mapy

– vzhledem k nejvhodnějšímu pokrytí mapového listu snímky (resp. celým počtem stereoskopických modelů) provedeme výpočet dvakrát a vybereme nejbližší celou hodnotu

$$m_s = \frac{d}{n \cdot s' \cdot \left(1 - \frac{p\%}{100}\right)} \quad \text{a} \quad m_s = \frac{\check{s}}{m \cdot s' \cdot \left(1 - \frac{q\%}{100}\right)}$$

$s'$  – rozměr snímku (23 cm),  $d$  – délka území,  $\check{s}$  – šířka území,  $n$  – počet základů v řadě,  $m$  – počet řad,  $p$  – podélný překryt,  $q$  – příčný překryt

Z obou způsobů pak zvolíme nejvhodnější (průměrnou) zaokrouhlenou hodnotu.

Pro státní mapování jsou měřítka snímků dána instrukcí. Pro klasický formát snímku 23 x 23 cm, délku území  $d = 2,5$  km a šířku území  $\check{s} = 2$  km (tj. mapový list SM 5), při použití širokoúhlé komory  $f = 152$  mm a výšce letu  $h = 3500$  m je měřítko snímku 1:23 000, pokud  $p = 60$  %,  $q = 24,4$  % a  $n = 1$ ,  $m = 0,5$ .

b) **výška letu**  $h = f_k \cdot m_s$ , je relativní výška nad terénem ( $m_s = \frac{h}{f_k}$ )

$H_i = H_{stř} + h$ , je absolutní (nadmořská) výška letu pro každou letovou řadu, kde  $H_{stř}$  – střední nadmořská výška terénu v jedné letové řadě

c) **základna**  $b = s' \cdot m_s \cdot \left(1 - \frac{p\%}{100}\right)$

Délka základny  $b$  je vzdálenost mezi středy vstupních pupil dvou po sobě jdoucích snímků, tj. dráha kterou uletí letadlo za časový interval  $\Delta t$  mezi dvěma expozicemi.

Předchozí tři určené veličiny ( $m_s$ ,  $h$ ,  $b$ ) musí nabývat vhodných hodnot (musejí být realizovatelné) a zároveň splňovat uvedené vztahy (jsou na sobě vzájemně závislé). Po jejich stanovení je možné pokračovat výpočtem dalších údajů:

d) **rozestup řad**  $a = s' \cdot m_s \cdot \left(1 - \frac{q\%}{100}\right)$ , vzdálenost dvou sousedních řad

e) **nová plocha snímku**  $P_n = a \cdot b$ , plocha jednoho stereoskopického modelu

f) **počet snímků**  $N = \frac{P}{P_n}$ , kde  $P$  – plocha snímkaného území (v km<sup>2</sup>)

g) **časový interval**  $\Delta t = \frac{b}{v}$ ,

kde  $v$  – předpokládaná provozní rychlost letu (max. 200 km/h)<sup>9</sup>

Časový interval  $\Delta t$  je doba mezi dvěma expozicemi po sobě jdoucích snímků, za kterou uletí letadlo provozní rychlostí  $v$  délku základny  $b$ .

Musí být delší než pracovní cyklus komory: 2-4 s (podle typu komory), tj. doba za kterou je komora připravena pořídit další snímek. Pro digitální měřické komory je limitem čas potřebný na odečtení signálu na čidlech, jeho digitalizaci a uložení pořízeného snímku.

h) **maximální délka osvitů**  $e_{\max} = \frac{\Delta s'_{\max} \cdot m_s}{v}$ ,

$\Delta s'$  – *smaz* je délka, o kterou se posune bod na snímku během expozice a je způsoben pohybem leteckého nosiče. Jeho maximální přípustná velikost  $\Delta s'_{\max}$  se volí jako průměr měřické značky (cca 0,05 mm).

<sup>9</sup> Provozní rychlost je rychlost letu během snímkování. Vyšší bývá přepravní rychlost, kterou se letadlo přemísťuje z letiště nad snímkaný prostor.

Expozici je třeba volit kratší než je maximální délka osvitu daná maximální přípustnou velikostí smazu:  $e < e_{max}$ .

Většina v současné době používaných komor má konstrukci s kompenzací smazu (resp. kompenzací pohybu leteckého nosiče) *FMC – Film / Forward Motion Compensation*, tj. kompenzace dopředným pohybem filmu ve směru letu během expozice.<sup>10</sup> Digitální letecké komory používají obdobu tohoto řešení *FMC-TDI – Time Delayed Integration*, tj. postupné předávání a odečítání informací (náboje) v řádcích senzoru (až o 50 pix).

i) **celkový čas snímkování**  $T = \Delta t \cdot N$

j) **spotřeba materiálu**

spotřeba skleněných desek se rovná počtu snímků  $N$  (+ 10 až 15%)

délka filmového pásu  $d = (s'+3cm) \cdot N + 10 \text{ až } 15\%$

U digitálních měřických komor je maximální počet snímků pořízených během jednoho snímkového letu omezen kapacitou datového úložiště (pevných disků). V současné době je možné disková pole pro ukládání dat během 2-3 minut za letu vyměnit, takže je kapacita téměř neomezená.

3. typ signalizace vlíčovacích bodů s náčrtem; do kdy bude signalizace provedena a kdo za ní zodpovídá
4. údaje o požadovaném fotografickém materiálu: množství – kolik negativů a pozitivů, jejich rozměr, kontaktní kopie nebo zvětšeniny a jejich měřítko, požadavek na zhotovení výřezů nebo na speciální materiál (IR, spektrozónální)
5. výpočet přibližné ceny podle sazebníku
6. podpis a razítko zodpovědné osoby nebo organizace

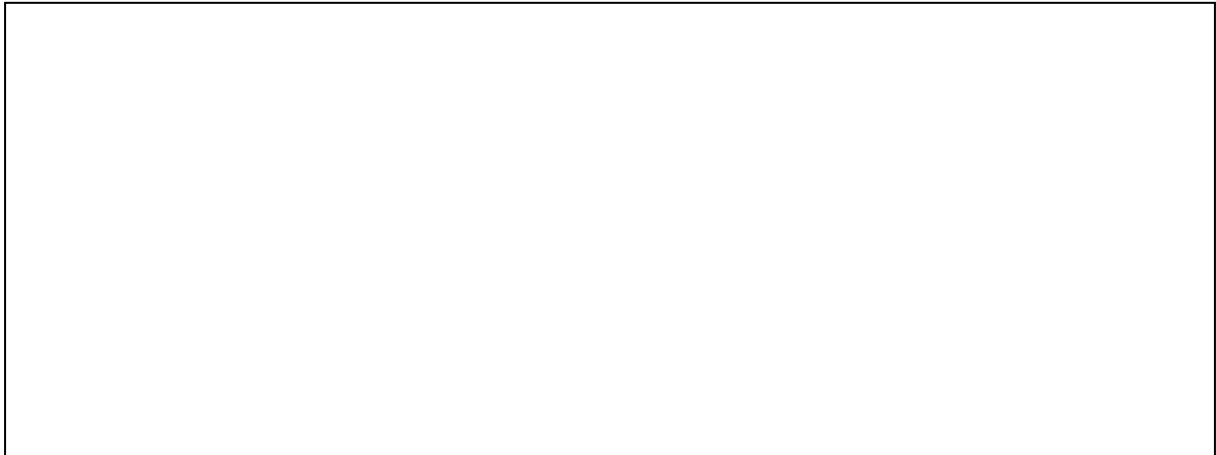
### – Grafická část

slouží pro navigaci letadla během snímkového letu.

Do mapy středního měřítká (1 : 50 000, 25 000, 10 000) nebo její kopie provedeme zákres: hranice mapovaného prostoru, směr a čísla letových řad s jejich absolutní nadmořskou výškou, vyznačíme nejnižší a nejvyšší bod terénu na každé letové čáře, středy a čísla snímků v řadě a orientační body na letové čáře (kostel, křižovatka, most, osamělý strom). Pro velká měřítká je při nedostatku orientačních bodů letová čára signalizována uměle. Signalizuje se nejen uvnitř mapovaného území, ale i před ním a za ním (pro přesné navedení letadla).

<sup>10</sup> Jiným řešením je kompenzace pohybu nosiče nakloněním komory *AMC – Aperture Motion Compensation*, používaná např. v dálkovém průzkumu Země (DPZ).

Prostor snímkování je dán rozměrem mapového listu (státní mapování), tvarem a velikostí zájmového území (tématické mapování), nebo směrem a šířkou liniového prvku (např. dálnice, železnice, plynovod, řeka).



Směr letu je nejčastěji západ ↔ východ (kvůli směru převládajících větrů v ČR), tak aby letadlo nebylo bočním větrem vynášeno z navržené letové čáry. Pro státní mapování jsou dráhy snímkového letu od roku 2003 voleny ve směru kladu mapových listů Státní mapy 1:5 000 (SM-5), resp. ve směru osy *Y* souřadnicového systému JTSK – procházejí horním okrajem rámců každé sudé řady mapových listů. Hornatá území (při tématickém mapování) se nalétávají ve směru údolí a hřbetů (důležité je zachování měřítko pro jednu letovou dráhu).



### ➤ Provedení snímkového letu

Posádku snímkového letu obvykle tvoří **pilot**, **navigátor** a **fotogrammetr**. Největším navigačním problémem je dodržení přímosti, rovnoběžnosti a odstupu jednotlivých řad (příčný překryt) a otočení snímku ve vlastní rovině ( $\kappa$ ). Zásadní vliv má přitom směr a síla větru.

V současné době se využívá programových balíčků určených pro plánování i následné řízení snímkového letu pomocí počítače (*Flight Management System*): podle v projektu předem vypočtených souřadnic předpokládaných středů vstupní pupily všech snímků a z během letu měřených prvků vnější orientace (DGPS/IMU) jsou v reálném čase určovány navigační údaje (předávané do pilotní kabiny) a automaticky spouštěna expozice komory. Pokud je dostupná funkce autopilota, může snímkový let probíhat plně automaticky.

V letecké fotogrammetrii jsou vlíčovací body nutné pro určení přesných hodnot prvků vnější orientace (během snímkového letu jsou určovány pouze přibližně). Pro velká měřítka mapy se umělá signalizace a **určení vlíčovacích bodů** provádí před snímkovým letem (např. geodetickým měřením pomocí GPS). Pro střední a malá měřítka se volí většinou přirozeně signalizované body až po snímkovém letu a jejich poloha a výška se určuje metodou aerotriangulace.

### ➤ Činnosti po snímkovém letu

Po nasnímování území následuje pro mapy středního měřítka **klasifikace snímků** a pro mapy velkého měřítka **místní šetření**.

Při klasifikaci vybíráme ze snímku informace, které mají být zobrazeny v mapě a doplňujeme ty, které nejsou ze snímku zjistitelné – vzniká **fotogrammetrický náčrt**, který usnadňuje a upřesňuje podrobné fotogrammetrické vyhodnocení.

Jako podklad pro klasifikaci slouží zvětšenina snímku v měřítku blízkém vznikající mapě. V kanceláři zakreslíme signalizované body bodového pole a vlíčovací body, polohopis, popis včetně mapových značek, názvosloví a údaje od jiných institucí (druhy porostů, obvod a hloubka nádrží, železniční pozemky, apod.). Všechny podrobné body se očíslovají. V terénu ověřujeme a doplňujeme údaje zakreslené v kanceláři – porovnáváme skutečný stav se stavem zachyceným na snímku a doplňujeme chybějící skutečnosti (např. studny, druhy plotů, apod.). Pro vyhodnocení výškopisu se také zakresluje terénní stupně (menší než je možné bezpečně rozpoznat při vyhodnocení – cca 1-2 m, podle měřítka snímků).

Při místním šetření dále zjišťujeme majetkoprávní vztahy (parcelní čísla, vlastníky pozemků), čísla popisná, kontrolní oměrné a přesahy střech.<sup>11</sup>

Po vyhodnocovacích pracích se provádí geodetické měření v terénu: **doplňovací měření** pro zakryté prostory, které nebylo možné fotogrammetricky vyhodnotit a **revizní měření** pro kontrolu přesnosti vyhodnocení polohopisu a výškopisu (např. kontrolní oměrné nebo kontrolní profily).

<sup>11</sup> Pomocí *okapometru* (posuvný kolimátor na tyči se stupnicí).

### 4.3. Letecké měřické komory a pomocná zařízení

Letecké měřické komory mohou pořizovat měřické snímky (se známými prvky vnitřní orientace) velkého formátu a vysokého rozlišení, a to dostatečně rychle v řadě za sebou, s krátkou dobou osvitů (setiny až tisíce vteřiny). Závěs komory musí umožňovat udržení osy záběru ve svislé poloze ( $\varphi = 0$  a  $\omega = 0$ ) a otáčení komory kolem osy tak, aby spojnice rámových značek byla ve směru letu ( $\kappa = 0$ ).

#### ➤ dělení leteckých komor

##### 1. podle obrazového úhlu (velikosti konstanty komory)

###### a) s malým obrazovým úhlem

$$f(23 \times 23) \geq 350 \text{ mm (až } 600 \text{ mm)}$$

speciální komory vhodné pro mapování ve velkých měřítkách a v intravilánu (v ČR nebyly dosud využívány)

###### b) s normálním obrazovým úhlem

$$f(23 \times 23) = 305 \text{ mm}$$

univerzální použití pro všechna měřítka a libovolný terén (tedy také pro velká měřítka a intravilán)

###### c) širokoúhlé komory

$$f(23 \times 23) = 150 \text{ mm}$$

především pro střední měřítka

(pro mapování ve velkém měřítku vhodné jen v extravilánu)

###### d) zvláště širokoúhlé komory

$$f(23 \times 23) = 90 \text{ mm}$$

vhodné pro malá a střední měřítka v extravilánu



##### 2. podle způsobu záznamu obrazu

###### a) deskové: skleněné desky (max. 40 snímků, nulová srážka podložky)

###### b) filmové: filmové pásy (až 480 snímků na 120 m filmu, automatická obsluha)

- c) *speciální*:  
*panoramatické komory* (úhel záběru  $180^\circ$  – expozice se provádí na zakřivenou plochu rotací optického členu kolmo na směr letu; na okrajích vznikají velké deformace; snímky nejsou vhodné pro měřické účely);  
*strip komory* (filmový pás se pohybuje ve směru letu nad otevřenou šterbinou – vzniká souvislý obrazový pás zatížený vlivy měnící se vnější orientace)
- d) *digitální*: pořizují přímo digitální (primární) obrazová data snímáním více čipy CCD pro pořízení výsledného obrazu velkého formátu a dostatečného rozlišení (princip vícenásobné komory), snímáním extrémně velkými maticemi prvků CCD nebo skenováním řádkou čidel (princip strip komory)
- e) *videosystémy*: mapování z nízkých letových hladin nižší přesnosti pro rychlý průzkum území nebo špionáž
- f) *termovize*: zjišťování úniků tepla ze stavebních objektů, znečištění řek nebo vyhledávání osob pomocí videozáznamu v infračervené a tepelné části spektra

### 3. podle obsluhy

- a) *ruční komory*: manuální obsluha bez pomocných zařízení (použití v archeologii a průzkumu menších území)
- b) *automatické – řadové komory*: určené pro mapovací práce, samočinně pořizují velké množství snímků v řadě za sebou, resp. jsou ovládány zprostředkovaně (např. přes regulátor překrytu); nekratší možná doba mezi pořízením dvou následujících snímků se nazývá **pracovní cyklus (chod) komory** (natažení závěrky, přetočení číselníku, převinutí filmu, přitlačení ke značkovému rámu, osvětlení rámových údajů, expozice), pohybuje se mezi cca 2-4 s; pro digitální komory je to doba potřebná na odečtení signálu z čidel, jeho digitalizaci a uložení snímku (v závislosti na rychlosti letu ovlivňuje možnost volby délky základny a podélného překrytu)

#### ➤ součásti letecké měřické komory



**1. tělo komory**

je vyrobeno z lehkých slitin nepodléhajících změnám vlivem teploty (rozdíl teplot na letišti a během letu může dosahovat až 50°C), má zásadní význam pro zachování stejných hodnot prvků vnitřní orientace

**2. objektivový nástavec**

skládá se z *objektivu* (velká světelnost, velký průměr, malé zkreslení – do 10  $\mu\text{m}$ , trvale zaostřený na nekonečno), *clony* (měnitelná podle světelných podmínek) a *filtru* (barevný nebo neutrální), objektivový nástavec bývá možné vyměňovat a tím volit různou konstantu komory (resp. obrazový úhel)

**3. závěrka**

umožňuje velmi krátké expozice (až 1/1000 s) pro omezení smazu, zejména při nízkých výškách letu ani nejkratší expozice nedostačují a musí být použita také kompenzace smazu

a) *mechanická*– *centrální*

světelná účinnost 60-80%;<sup>1</sup> vhodná pro velké průměry objektivu (rychle se opotřebí namáhané osičky rotujících clon)

– *rotační*

světelná účinnost 90%; podobná centrální závěrce; clony neustále rotují, krátce před expozicí se odsune velká lamela a po expozici opět zacloní průchod světla

– *žaluziová*

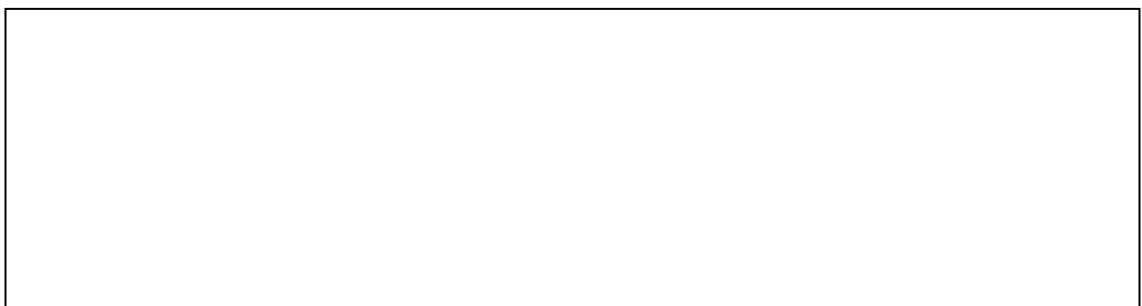
světelná účinnost 70-80%; vhodná pouze pro objektivy s malým obrazovým úhlem ( $f$  cca 300 mm); v obraze se projevují změny jasu; příliš se nepoužívá

b) *elektronická* (pouze pro digitální komory)

světlo dopadá na senzor nepřetržitě, ale jeho intenzita se odečítá pouze po dobu expozice (lze kombinovat s mechanickou závěrkou)

**4. značkový rám**

je upevněn v horní části komory a je na něm umístěno 4 až 8 *rámových značek* (mechanické nebo optické – uměle osvětlené)<sup>2</sup> a *rámové údaje* (číslo snímku, datum a čas pořízení snímku, obraz krabicové libely a výškoměru, údaje o komoře – číslo a konstanta komory, šedý klín – kontrola hustoty negativu, případně ručně na matnici vypsané údaje o lokalitě a projektu)



<sup>1</sup> Světelná účinnost je poměrné množství dopadajícího světla, které při expozici závěrkou projde.

<sup>2</sup> Některé typy komor mají po obvodu rámu větší množství značek pro přesnější určení velikosti srážky snímku.



### 5. kazeta na film nebo desky

je samostatné zařízení, které chrání fotografický materiál před nežádoucím osvětlením; připraví se na zemi přes snímkový letem; zajišťuje převíjení, posun filmu (nebo výměnu desek) a jeho přilnutí ke značkovému rámu při expozici (přítlačná deska a pumpa pro pneumatické vyrovnání filmu); připojena jsou další zařízení (např. číselníky pro číslování snímků)

### 6. kompenzace smazu (pohybu leteckého nosiče komory)

*FMC (Film / Forward Motion Compensation)* – posun celé přítlačné desky i s filmem během expozice ve směru letu (až  $10 \text{ mm/s}$ ); pro digitální komory *FMC-TDI (Time Delayed Integration)* – postupné předávání a odečítání informací (náboje) v řádcích senzoru (až o  $50 \text{ pix}$ )

### 7. závěs komory

je kruhový rám připevněný 3-4 stavěcími šrouby ke kostře letadla; vybaven tlumiči (omezují přenos chvění letadla na komoru) a krabicovými libelami; musí umožňovat otáčení komory kolem optické osy (úhel  $\kappa$ ); je vybaven *gyrostabilizací* pro automatickou horizontaci komory (osa záběru je svislá)

## ➤ Pomocná zařízení

Pomocná zařízení slouží pro určování přibližných hodnot prvků vnější orientace ( $X_0, Y_0, Z_0, \kappa, \varphi, \omega$ ) a délky základny  $b$  během snímkového letu. Pro *svislé měřické snímky* je třeba dodržet přibližně normální případ ( $\varphi, \omega \leq 3^\circ$ ) a především pro *dvousnímkové metody* spojnici rámových značek ve směru letu ( $\kappa \leq 3^\circ$ ) tak, aby byl splněn požadavek na překrytovou část snímků (60-80 %) a mohl vzniknout kvalitní stereoskopický vjem na dostatečné ploše.

### 1. délka základny $b$

#### a) intrvalometr

spouští uzávěrku v časových intervalech daných rovnicí  $\Delta t = \frac{b}{v}$ ,

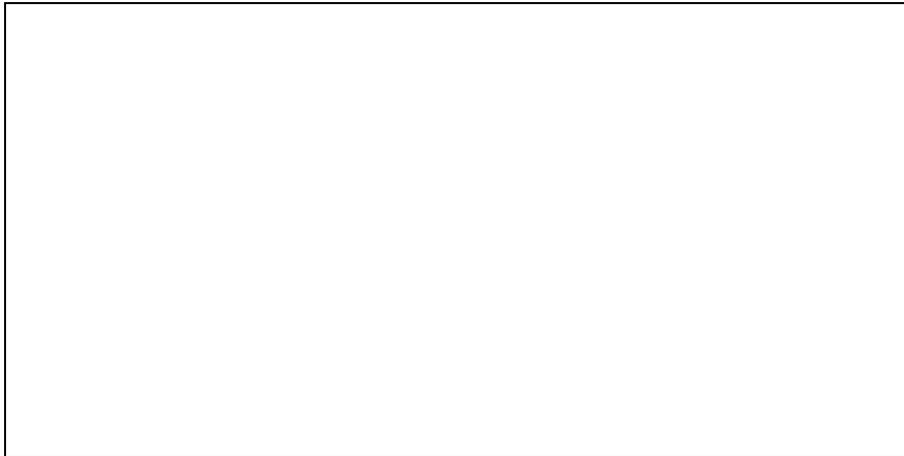
$\Delta t$  – časový interval mezi pořízením dvou následujících snímků,  $b$  – délka základny,  $v$  – rychlost letu (plánovaná), přesnost určení délky základny je značně omezena odchylkami od plánované rychlosti letu

#### b) regulátor překrytu

zařízení se samostatným objektivem, pomocí kterého fotogrammetr ovládá délku časového intervalu  $\Delta t$  v závislosti na rychlosti letu – na matnici sledujeme terén pod letadlem a žebřík, který ubíhá a jehož rychlost je možné měnit podle rychlosti letu; pokud žebřík vypadá jako nakreslený na terénu, pak je rychlost žebříku a letadla stejná; po uplynutí (odměření) zvolené délky základny  $b$  spínač automaticky provede expozici; snímky jsou pořizovány se správnou základnou i podélným překrytem

### 2. úhel $\kappa$

má být nastaven alespoň přibližně na nulovou hodnotu (snímek není stočený a spojnice rámových značek jsou ve směru letu); **regulátorem překrytu** lze otáčet (společně se otáčí i komora) a ztotožnit směru ubíhání terénu pod letadlem se směrem ubíhání žebříku; je korigován tzv. *snos* letadla



### 3. výška letu $h$

#### a) **barometrický výškoměr**

jednoduché zařízení určující *nadmořskou výšku* na základě změny atmosferického tlaku; přesnost 30-50 m (tj. orientační)

#### b) **statoskop**

kapalinový tlakoměr určující *převýšení* mezi prvním a následujícími snímky letu; přesnost 1-2 m; rozsah měření  $\pm 60$  m

#### c) **radiový výškoměr**

určuje *výšku letu nad terénem  $h$*  z měření času odrazů radiových vln; přesnost 2-5 m

#### d) **laserový výškoměr**

nákladné zařízení, které vysílá modulovaný světelný paprsek a zaznamenává jeho odrazy od zemského povrchu, přesnost určení *výšky letu nad terénem* je řádově 0,1 m (podle povrchu na terénu)

### 4. úhly $\varphi, \omega$

#### a) **krabicová libela**

určuje svislost osy záběru s přesností přibližně  $1^\circ$  (odpovídá vzdálenosti nejbližších soustředných kružnic); její obraz se přenesse při expozici na snímek



#### b) **horizontální komory**

dvě komory, s osami záběru ve směru letu a kolmo na něj, snímají pozemský horizont nebo horizont mraků; jejich proměření určíme úhly  $\varphi, \omega$  s přesností  $2'$

c) **gyrostabilizace**

používá k udržování svislé osy záběru speciálního závěsu se setrvačníky rotujícími vysokou rychlostí (2000 ot/s a více); odklon od svislého směru do 20°

5. souřadnice  $X_0, Y_0$ 

Pro velká území s nedostatkem bodů o známých geodetických souřadnicích byly vypracovány různé **radiolokační systémy** pro určení polohy letadla během letu (měření délek od 2-3 referenčních bodů až několik set km vzdálených). Přesnost určení polohy se pohybuje kolem 20 m.

Na území ČR s dostatkem orientačních a vlíčovacích bodů nebylo nutné tato pomocná zařízení pro určování polohy používat.

6. určení polohy a orientace v prostoru  $X_0, Y_0, Z_0, \kappa, \varphi, \omega$ a) **D-GPS**

používá diferenciální metodu GPS pro *určování polohy blízkého přijímače* (umístěného na letadle, nad komorou) *od pevné referenční stanice* o známých souřadnicích (na letišti). Protože během navigace letadla je třeba určovat polohu v reálném čase, je možné používat pouze kódová měření (nikoli fázová).

Jestliže jsou antény umístěny také na křídlech i na zádi letadla, lze určovat nejen polohu, ale i orientaci v prostoru (náklony letadla a komory). Údaje o měření prvků vnější orientace jsou zaznamenány ke každému snímku. Přesnost v určení polohy je kolem 0,2 m.

b) **GPS / IMU** (*Global Positioning System / Inertial Measurement Unit*) nebo **GPS / INS** (*Inertial Navigation System*)<sup>3</sup>

je soubor zařízení (řídící jednotka a čidla) sloužících pro *určení změny polohy, rychlosti a orientace v prostoru* od výchozího stavu. Náklony komory jsou určovány pomocí soustavy gyroskopů (rotující setrvačníky), změny rychlosti pohybu (tj. zrychlení) akcelerometry a takto průběžně určovaná dráha letu je korigována měřením GPS (opravy systematických chyb v poloze).

<sup>3</sup> Označení *GPS / IMU* se postupně ve shodě s přibývajícím využitím dalších satelitních navigačních systémů mění na *GNSS / IMU* (*Global Navigation Satellite System*).

Původně vojenský systém armády USA pro navádění řízených střel byl uvolněn pro civilní sektor. V současné době je to nejpřesnější, ale také nejdražší zařízení pro určování prvků vnější orientace během letu nebo také pro pozemní mobilní mapovací systémy. Mapování pro střední a malá měřítka lze provádět i bez vlíčovacích bodů – tzv. *přímé georeferencování*. Přesnost určení polohy je přibližně  $0,1\text{ m}$ .

7. **systémy pro řízení snímkového letu** (*FMS – Flight Manager System*) zajišťují elektronické řízení chodu komory, tj. komunikaci mezi komorou, jednotkou GPS/IMU a navigátorem, který navádí letadlo podle zadaného projektu snímkového letu pomocí navigačního dalekohledu. V okamžiku, kdy se shoduje poloha letadla s v projektu navrženým umístěním snímku, systém automaticky spustí expozici.

Závěs komory s gyrostabilizací současně udržuje osu záběru svislou (úhly  $\varphi$  a  $\omega$  do  $3^\circ$ ) a podle měření jednotky GPS / IMU je automaticky nastavováno i otočení komory, tj. spojnice rámových značek ve směru letu (úhel  $\kappa$  přibližně nulový). Pokud je také zapojen systémem řízení letadla - autopilot, může let probíhat plně automaticky.

#### ➤ Letecké měřické komory

##### – filmové komory:

Vývoj filmových leteckých měřických komor dospěl ke svému konci. Parametry ještě používaných výrobků jsou velice podobné: snímky se pořizují ve čtvercovém formátu  $23 \times 23\text{ cm}$  (pro další zpracování jsou digitalizovány na fotogrammetrických skenerech), objektivy komor jsou nejčastěji s normálním obrazovým úhlem nebo širokoúhlé, umožňují krátké expozice (až  $1/1000\text{ s}$ ), komory využívají kompenzaci smazu *FMC*, závěs s gyrostabilizací a měření prvků vnější orientace během snímkového letu jednotkou *GPS/IMU*. Filmové komory jsou postupně nahrazovány komorami digitálními. Stále v provozu ještě mohou být tyto typy komor:

- **LMK** – *Luft Messung Kammer (Carl Zeiss Jena)*  
ve značkovém rámu jsou umístěny skleněné lišty se značkami po  $10\text{ mm}$  pro přesnější zjištění srážky
- **RMK** – *Reihen Mess Kammer (Opton Oberkochen – Zeiss)*,  
**RMK-Top** – *Terminal Operated (Intrgraph – Z/I Imaging)*
- **RC 30** (*Leica Geosystems*, původně *Wild*)  
další typy vyráběné firmou *Wild* byly označovány podle velikosti konstanty komory *RC 8, 9, 10, 20*

### – digitální komory:

pořizují přím digitální obrazová data s vyšším radiometrickým rozlišením (větší barevná hloubka), které zlepšuje rozpoznání objektů např. ve vržených stínech. Vysoká citlivost prvků CCD ke světlu také umožňuje použití velmi krátkých expozičních a snímání i za zhoršených světelných podmínek. Prvky vnitřní orientace musejí být, stejně jako u všech měřických komor, známé a neměnné.<sup>4</sup> Objektivy musí splňovat požadavky na měřické komory – tj. velikost radiální distorze nepřekračuje hodnotu  $10 \mu\text{m}$ . Komory se umísťují do závěsů s *gyrostabilizací* a využívají měření prvků vnější orientace jednotkou *GPS/IMU*. Pro přesné mapovací práce ale zůstává potřeba signalizace alespoň několika výchozích (vlíčovacích) bodů. Chod komory a navigace letadla jsou zajišťovány *systemy pro řízení snímkového letu – FMS*.

Digitální komory lze rozdělit podle velikosti rozlišení (resp. podle celkového počtu pixelů v digitálním obraze) na komory velkoformátové a komory středního formátu:

#### 1. Digitální velkoformátové komory

jsou charakterizovány velikostí alespoň jednoho rozměru snímku minimálně  $11.000 \text{ pix}$ , tzn. snímek odpovídá alespoň v jednom rozměru klasickému formátu  $23 \text{ cm}$ , který by byl naskenován s rozlišením  $20 \mu\text{m}$  (tj.  $1270 \text{ DPI}$ ). Vnitřní přesnost komory, daná přesností uspořádání jednotlivých čidel do řádek a sloupců, má být do  $2 \mu\text{m}$ .

##### a) konstrukce na principu vícenásobné komory<sup>5</sup>

- **DMC 2001** – *Digital Modular Camera (Z/I Imaging, 2001)*<sup>6</sup>

V roce 2000 byl na kongresu *ISPRS* představen prototyp první digitální letecké měřické komory. Vznikla na základě spolupráce firem *Carl Zeiss* a *Intergraph*.

- **DMC** – *Digital Mapping Camera (Intergraph – Z/I Imaging, 2003)*<sup>7</sup>

Roku 2003 se tato komora dostala na trh. Obraz je složen ze snímků pořízených čtyřmi digitálními komorami s maticemi CCD prvků firmy *Philips*  $4096 \times 7168 \text{ pix}$  (tj.  $29 \text{ Mpix}$ ) – rozměr čipu je  $86 \times 49 \text{ mm}$  (stejný snímač jako v komoře pro pozemní fotogrammetrii *ICAM*). Tato konstrukce je použita, protože matici o rozměrech  $23 \times 23 \text{ cm}$  nelze vyrobit (při velikosti jednoho čidla CCD  $10 \mu\text{m}$  by měl takový snímek velikost  $23.000 \times 23.000 \text{ pix}$ , tj.  $529 \text{ Mpix}$ ).

<sup>4</sup> Hodnoty prvků vnitřní orientace se ověřují alespoň jednou za dva roky a vystaví se nový kalibrační protokol.

<sup>5</sup> Princip snímání více kamerami, tzv. vícenásobnou komorou je znám již od roku 1930 (první konstrukce čtyřnásobné komory ve firmě *Zeiss*) a byl použit například pro snímkování Arktidy ze vzducholodi Graf *Zeppelin* roku 1931.

<sup>6</sup> Společnost *Z/I Imaging* vznikla spoluprací firem *Zeiss* a *Intergraph* v oboru fotogrammetrie v roce 1999. Obě firmy se společně podílejí na vývoji fotogrammetrické techniky již od 80. let 20. století.

<sup>7</sup> Od roku 2002 vlastní celou společnost *Z/I Imaging* firma *Intergraph* (koupila zbývajících 40% od firmy *Carl Zeiss Jena*).

Snímky jsou pořízeny v jednom okamžiku. Po expozici je třeba odečíst, digitalizovat a uložit velké množství dat. Výsledný obraz je spojen z dílčích snímků do jediného středového průmětu o velikosti  $13.824 \times 7.680 \text{ pix}$  (tj.  $105 \text{ Mp}$ ). Takovýto snímek odpovídá analogovému snímku formátu  $23 \times 12,7 \text{ cm}$ , který by byl naskenován s velikostí čidla  $17 \mu\text{m}$  (tj.  $1490 \text{ DPI}$ ). Tento černobílý (panchromatický) obraz je doplněn o barevnou informaci a infračervené pásmo pomocí záznamů z dalších čtyř kamer nižšího rozlišení ( $2048 \times 3072 \text{ pix}$ , tj.  $6,5 \text{ Mpix}$ ) s filtry (R, G, B, a NIR) – tzv. *pansharpening*. Protože je výsledný obraz středovým průmětem zemského povrchu, lze pro jeho zpracování použít běžné fotogrammetrické postupy a techniku.

V případě této konstrukce komory lze použít kompenzaci smazu *FMC-TDI*, a proto je snímkování možné již od  $300\text{-}500 \text{ m}$  výšky letu nad terénem.

- *UltraCam D* (Vexcel Imaging, 2004)
- *UltraCamX* (Vexcel Imaging, 2006; Microsoft - Vexcel Imaging, 2007)<sup>8</sup>
- *UltraCamXp* (Microsoft - Vexcel Imaging, 2008)
- *ULTRACAM EAGLE* (Microsoft - Vexcel Imaging, 2011)
- *AIC x4 – Digital Mapping Camera* (RolleiMetric, 2007; Trimble, 2008)<sup>9</sup>  
viz. *AIC*

#### b) *konstrukce s extrémně velkými senzory*

- *DMC II 140, 230, 250* (Intragraph – Z/I Imaging, 2011)

Tato nová řada komor využívá technologie, která byla dosud používána pouze ve specializovaných astronomických zařízeních (vesmírné teleskopy apod.) – jsou to matice prvků CCD (senzory) extrémně velkých rozměrů vyráběné firmou *DALSA* pro společnost *Z/I Imaging*. Komory jsou vyráběny ve třech variantách s velikostí výsledného obrazu  $140 \text{ Mpix}$  ( $12.096 \times 11.200 \text{ pix}$ ),  $230 \text{ Mpix}$  ( $15.552 \times 14.144 \text{ pix}$ ) a  $250 \text{ Mpix}$  ( $16.768 \times 14.016 \text{ pix}$ ) – čtvrtou verzí je komora středního formátu *RMK DX* s podobnou technologií a  $144 \text{ Mpix}$ . Velikosti čidel (jednoho prvku CCD) jsou  $7,2$  nebo  $5,6 \mu\text{m}$  (pro *DMC II 250*).

<sup>8</sup> V roce 2007 koupila firmu *Vexcel* společnost *Microsoft*.

<sup>9</sup> V roce 2008 koupila firmu *RolleiMetric* společnost *Trimble*.

Černobílý (panchromatický) snímek vzniká jediným velkým senzorem a další čtyři komory s barevnými filtry pořizují snímky v pásmech R, G, B a NIR (blízké infračervené záření). Výsledný barevný snímek z komory *DMC II 250* odpovídá analogovému snímku formátu *23x20 cm*, který by byl naskenován s velikostí čidla  $14 \mu\text{m}$  (tj. cca *1800 DPI*). Všechny komory využívají optiku od firmy *Zeiss*.

### c) *konstrukce s lineárními senzory*

- ***ADS 40 – Airborn Digital Sensor (Leica Geosystems, LH-Systems, 2001)***<sup>10</sup>

První typ komerčně dostupné digitální letecké měřické komory, která původně vznikla jako společný projekt firem *Leica, BAE Sytems - Helava Associates a Erdas*. Tři lineární senzory (řádky CCD prvků) o délce *12.000 pix (78 mm)* skenují terén ve třech úhlech pohledu (vpřed, svisle-nadír, vzad) – vznikají tři kontinuální černobílé (panchromatické) obrazové pásy. Ve směru k nadiru snímají další čtyři řádky barevný a infračervený obraz (R, G, B, NIR). Rozlišení je zvýšeno zdvojením řádky pro panchromatické snímání a vzájemným posunem těchto dvou řádek o polovinu velikosti prvku CCD – výsledná řádka pixelů má pak dvojnásobné rozlišení.

Pro odstranění deformací obrazu, způsobených nestabilitou nosiče během letu, je nutné současné, nepřetržité měření prvků vnější orientace pomocí jednotky GPS/IMU. Na přesnosti určení prvků vnější orientace závisí i přesnost výsledného obrazu, který není středovým průmětem – po odstranění jejich vlivu na každou jednotlivou řádku vzniká ortofotomapa.

Zařízení je jednodušší konstrukce než při použití matic CCD a senzor je levnější. Kompenzace smazu ale není proveditelná, a proto lze snímkovat až z vyšších letových hladin. Výhodou je přímý vznik barevného obrazu (přesnější radiometrické podání) – pásma R, G, B a NIR jsou měřena ve vysokém rozlišení, a proto není třeba používat dobarvování černobílého snímku barevnými snímky s nižším rozlišením (*pansharpening*).

- ***ADS 80 – Airborn Digital Sensor (Leica Geosystems, 2008)***<sup>11</sup>

Využívá nového typu senzoru (vznikl r. 2006), kde jsou čtyři řádky pro barevné (R, G, B) a infračervené (NIR) snímkování ve směru k nadiru i vzad. Řádky pro panchromatické snímání jsou stejně jako v předchozí verzi ve všech třech směrech a k nadiru jsou zdvojené.

## 2. *Digitální komory středního formátu*

mají poskytovat digitální měřické snímky velikosti alespoň *4000 x 4000 pix* (tj. *16 Mpix*), tzn. snímek odpovídá formátu *8 x 8 cm*, který by byl naskenován s rozlišením  $20 \mu\text{m}$  (*1270 DPI*), resp. *6 x 6 cm* s rozlišením  $15 \mu\text{m}$  (*1630 DPI*).

<sup>10</sup> Společnost *LH Systems* vznikla v roce 1997 – spolupráce firem *Leica* a *BAE Systems* trvala již od roku 1992.

<sup>11</sup> Od roku 2001 vlastní celou společnost *LH Systems* firma *Leica Geosystems* (koupila zbývajících 50% od firmy *BAE Systems - Helava*).

Prvky vnitřní orientace musejí být známé. Podobně jako velkoformátové komory využívají závěs s gyrostabilizací a měření prvků vnější orientace jednotkou GPS/IMU – snímky jsou přímo georeferencované (pro mapování ve středním měřítku odpadá potřeba signalizace množství vlíčovacích bodů v terénu). Velká část těchto komor je přímo určena k propojení s leteckým laserovým skenerem a tedy pro tvorbu digitálního ortofota – během jednoho letu jsou pořízeny snímky a změřen digitální model terénu.

- *AIC – Aerial Industrial Camera (RolleiMetric, 2007; Trimble, 2008)*
- *DSS 439 – Digital Sensor System (Trimble - Applanix, 2010)*<sup>12</sup>
- *RMK D (Intergraph – Z/I Imaging, 2009)*
- *RMK DX (Intergraph – Z/I Imaging, 2011)*
- *RCD 105 (Leica, 2007)*
- *RCD 100 (Leica, 2009)*
- *RCD 30 (Leica, 2011)*
- *UltraCam L a Lp (Microsoft - Vexcel Imaging, 2009)*

---

<sup>12</sup> V roce 2003 koupila firmu *Applanix* společnost *Trimble*.



### ➤ Videosystémy

- **Top Eye™ Saab**

Základem je videokamera nebo termovize umístěná na vrtulníku, doplněná přijímačem GPS a CCD kamerou vysokého rozlišení s elektronickou uzávěrkou. K videozáznamu je nahráván údaj o čase potřebný pro propojení s měřením GPS. Mapovací systém je doplněn leteckým laserovým skenerem. Výstupem je georeferencovaný videozáznam a digitální model území. Výsledky mohou být k dispozici okamžitě. Výsledná přesnost je cca 10-30 cm v souřadnicích, přitom náklady jsou jednou desetinou nákladů geodetického zaměření stejného území. Videosystémy se používají pro rychlý průzkum území a armádní účely.

### ➤ Letecké nosiče

a) *letadlové laboratoře*

pohybují se ve vysokých letových hladinách; komory mají malý obrazový úhel (velkou konstantu komory); používané pro účely špionáže

$h = 5000-20.000\text{ m}$ ,  $T_{max} = 10x\text{ h}$ ,  $1 : M \approx 1 : 100\ 000$ , šířka záběru  $\approx 10x\text{ km}$

- **U2**

b) *letadla*

nejčastější pro běžné mapovací práce; vhodné jsou dvoumotorové, vrtulové, hornokřídle jednoplošníky, zavěšení komory má být v těžišti (mezi křídly), podstatná je stabilita během letu

$h = 500-8000\text{ m}$ ,  $T_{max} = 5-8\text{ h}$ ,  $1 : M \approx 1 : 5000\text{ až }20.000$ , šířka záběru  $\approx 5\text{ km}$ ,

Dříve převážně používaná větší letadla mají pracovní rychlost (tj. minimální možnou) kolem 200 km/h a dostup (maximální výšku letu) 7000 až 9000 m.

- **Let L-410 FG (CZ)**

nahradil starší typ letounů po roce 1985; v současné době používán také pro letecké laserové skenování; stále se vyrábějí nové typy

- **Antonov An-30 FG (SSSR, Rusko)**

pro ČR získán z Bulharska v 90. letech 20. stol, dosud používán v mezinárodním programu *Open Skies*

- **Beechcraft Super King Air B200 (USA)**

- Geodis Brno

- **Cessna 402 Business Liner OK (USA)**

- Geodis Brno

- **Piper PA 31-350 Chieftain (USA)**

- ArgusGeo Hradec Králové

V současné době často používaná letadla jsou menší a lehčí, pracovní rychlost v se pohybuje kolem  $100 \text{ km/h}$  a dostup bývá  $5000\text{-}7000 \text{ m}$ . Výhodou je možnost nízkých výšek letu  $300\text{-}500 \text{ m}$  nad terénem.

- **Cessna 206F Stationair OK-EKT a 206G Stationair OK-HKE (USA)**  
- Geodis Brno
- **Cessna Skywagon TU206 (USA)**  
- ArgusGeo Hradec Králové
- **Piper Aztec (USA)**  
- ArgusGeo Hradec Králové
- **Pilatus Turbo Porter PC-6 (Švýcarsko)**

c) *vrtulníky*

nejsou vhodné pro měřické komory, protože by se chvění vrtulníku přenášelo na komoru; používají se jako letecké nosiče pro semiměřické komory středního formátu – např. *réseau komory* (dopravní policie), videosystémy, termovizi a letecké laserové skenery

$$h = 50\text{-}2000 \text{ m}, T_{max} = 1x h, 1 : M \approx 1 : 1000$$

- **MI-2, MI-8, MI-17**  
- armáda a police ČR

d) *řízené bezpilotní prostředky – modely*

levné řešení pro průzkum menších území nebo špionáž; výhodou je nízká výška letu, možnost snímkování i obtížně přístupných míst a vysoká operativnost, nevýhodou je krátký dolet (doba provozu);  $h = 50\text{-}1000 \text{ m}$

e) *neřízené bezpilotní prostředky*

f) *visuté plošiny - pseudoletecká fotogrammetrie*

komora se svíslou osou záběru je umístěná na jeřábové plošině nebo jiným způsobem vytažena do výška; používá se např. pro dokumentaci archeologických nalezišť

#### 4.4. Jednosnímková letecká fotogrammetrie

Princip metody je shodný s jednosnímkovou pozemní fotogrammetrií. Snímky se ale pořizují s alespoň přibližně svislou osou záběru a slouží především pro mapovací práce ve středním měřítku. Zpracovat lze pouze jednotlivé snímky. Výsledkem vyhodnocení je jen polohopis mapy – je možné zjišťovat souřadnice  $X$ ,  $Y$  v rovině. Využívá se pro mapování nezalesněného, ale i zastavěného území s rovinným terénem.

Pro překreslení nebo kolineární transformaci snímku (tzn. pro určení vztahů mezi rovinou snímku a rovinou mapy) potřebujeme alespoň 4 vlíčovací body rovnoměrně rozložené na každém snímku (tj. umístěné přibližně v rozích). Vztah mezi mapou a snímkem vyjadřuje *Pappova věta* o dvojnásobku čtveřice bodové – dvojitý poměr délkových úseků mezi čtyřmi body na jedné přímce zobrazenými na snímku a v mapě se středovým průmětem z roviny na rovinu zachovává (nezachovávají se ani délky, ani úhly, ani plochy).

Jednosnímková letecká fotogrammetrie byla použita pro získání polohopisu v ***kombinované metodě mapování***. Výškopis mapy je doměřen geodeticky.

##### ➤ metody vyhodnocení

###### a) *grafické metody vyhodnocení*

byly používány pro vyhodnocení bez jakékoli přístrojové techniky pouze podle zásad deskriptivní geometrie; obsah snímku je možné ručně překreslit *proužkovou metodou* nebo *metodou projekčních sítí* (pravidelných a nepravidelných); výsledná přesnost je malá

###### b) *opticko-grafické metody – obkreslování snímku*

rychlá ale málo přesná metoda určená pro doplňování polohopisu map malých a středních měřítek pomocí *obkreslovače* (základní součástí je dvojitý polopropustný hranol); místo vlíčovacích bodů postačují totožné body polohopisné situace; před obkreslováním nových objektů do mapy je třeba pomocí těchto bodů co nejlépe ztotožnit obraz na snímku a v mapě

###### c) *opticko-mechanické metody – překreslování snímku*

pomocí opticko-mechanického zařízení, které se nazývá *překreslovač* je převedena rovina snímku do roviny mapy (překreslovač realizuje středové promítání z roviny na rovinu) – provádí se úprava měřítka a odstranění perspektivního zkreslení skloněného snímku, takže získáváme zobrazení snímku ideálně svislého; výsledkem překreslení je polohopisný podklad, který nazýváme ***fotoplán***; skládáním více fotoplánů vzniká ***fotomozaika***<sup>1</sup> a pokud jsou do překreslených snímků zakresleny další prvky (např. obsah katastrální mapy nebo vrstevnice) získáváme ***fotomapu***. Překreslovače se dnes již v jednosnímkové metodě nepoužívají.

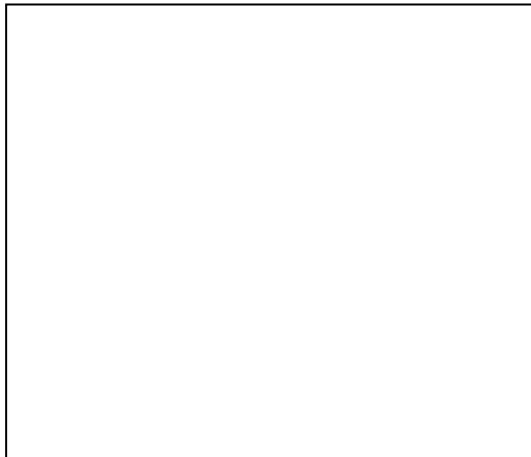
<sup>1</sup> Montáž fotoplánu a tvorba mozaiky se dříve prováděla pomocí kovových čepů nebo lepením na konstrukční list.

- **SEG I, Rectimat-C (Zeiss)**
- **SEG 6 (Opton)**

d) **kolineární rovinná transformace rastru – digitální překreslení snímku** v současné době se překreslení z roviny snímku do roviny mapy provádí na počítačích, pomocí **kolineární rovinné transformace rastru** (tj. digitálního, rastrového snímku);<sup>2</sup> transformace je matematickým vyjádřením středového průmětu z roviny na rovinu a k vyřešení jejího transformačního klíče je nutné znát geodetické souřadnice alespoň 4 vřícovacích bodů (vhodnější je nadbytečný počet 8 až 12 bodů); transformace mění souřadnice (tzn. polohu) jednotlivých pixelů v digitálním obraze; jestliže je na pokrytí mapovaného území potřeba pořídit více snímků, je po jejich překreslení třeba provést **maskování** (tj. oříznutí přebytečných, překrývajících se částí) a **tvorbu mozaiky** (tzv. *montáž fotoplánu*) – při zpracování na počítačích je možné na stycích snímků upravit kontrast a provést barevné vyrovnání, tak aby přechod v místě řezu nebyl znatelný; nad překreslenými snímky (tj. fotoplánem) nebo fotomozaikou je možné provést **vektorizaci** polohopisu mapy – vzniká fotomapa.

### ➤ radiální posuny

Protože prostorové (resp. výškové) členění terénu nebo převýšení budov nad terénem v jednosnímkových metodách zanedbáváme, vznikají v poloze bodů ležících mimo rovinu překreslení chyby, které nazýváme **radiální posuny**.<sup>3</sup> V jednosnímkové fotogrammetrii nelze tyto chyby odstranit. Z podobnosti pravoúhlých trojúhelníků platí:



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

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

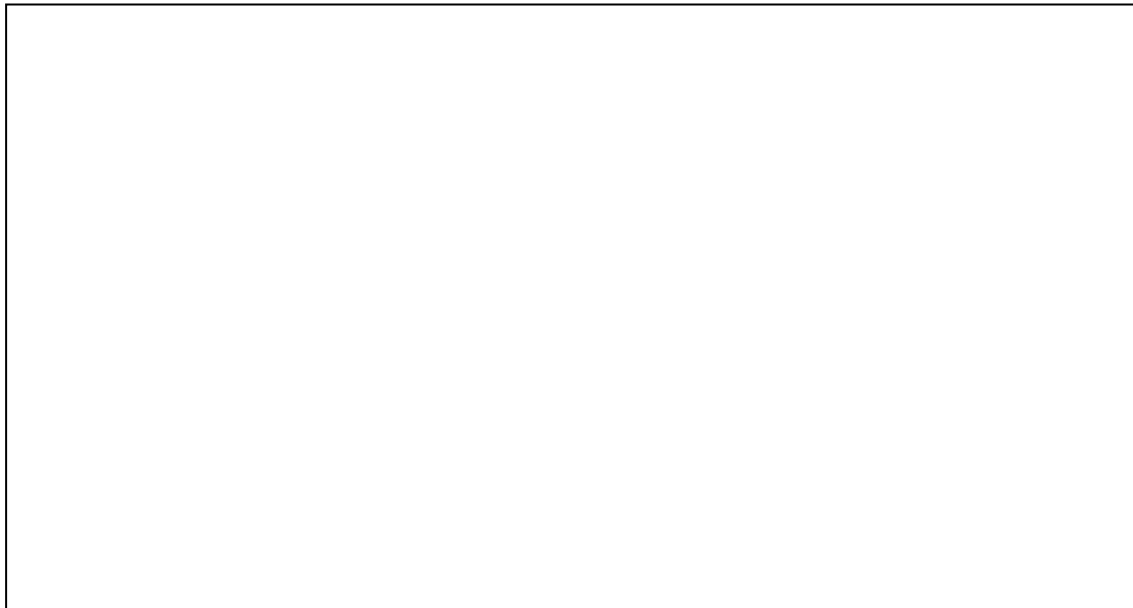
kde  $\Delta h$  – výškový rozdíl nad nebo pod rovinou překreslení,  $\Delta r$  – velikost radiálního posunu ve skutečnosti,  $r'$  – radiální vzdálenost obrazu bodu  $P$  od hlavního bodu,  $f$  – konstanta komory,  $\Delta \bar{r}$  – velikost radiálního posunu na fotoplánu,  $m_F$  – měřítkové číslo fotoplánu.

<sup>2</sup> Jiné typy transformací (např. polynomičnou, afinní nebo podobnostní) není vhodné používat – nejsou určeny pro práci s obrazy, které vznikly a mají být zpracovány pomocí středového promítání.

<sup>3</sup> Na leteckých snímcích se radiální posuny projevují „padáním“ budov v radiálním směru – od středu k okrajům (střechy jsou radiálně posunuty mimo základy budov).

Velikost radiálního posunu závisí především na velikosti výškového rozdílu  $\Delta h$  (větší převýšení způsobí větší radiální posuny), vzdálenosti bodu od hlavního bodu  $r'$  (v okolí středu snímku jsou radiální posuny minimální nebo nulové, nejvíce se projevují na okrajích snímku) a na konstantě použité komory  $f$  (výhodnější jsou komory s delší konstantou a menším obrazovým úhlem).

Jestliže by byly hodnoty radiálních posunů v území příliš velké (tzn. přesáhly by požadovanou grafickou přesnost mapy), je možné provést **překreslení po vrstvách**<sup>4</sup> nebo použít *metodu digitálního ortofota* (dříve *diferenciální překreslení snímku*, tj. integrovanou metodu mapování).



---

<sup>4</sup> Zvolí se dvě roviny překreslení v různých nadmořských výškách, uprostřed vrstev vysokých maximálně jako dvojnásobek největšího možného převýšení (daného největším přípustným radiálním posunem). Vyhotoví se masky rozdělující snímek na dvě části linií, která leží uprostřed mezi oběma vrstvami. Každá vrstva se překresluje samostatně s vlastními vlíčovacími body a z překreslených snímků se vytvoří mozaika.

## 4.5. Dvousnímková letecká fotogrammetrie

Princip metody s využitím umělého stereoskopického vjemu je podobný jako ve dvousnímkové pozemní fotogrammetrii a pokud jsou snímky pořízeny s alespoň přibližně svislou osou záběru, potom jsou osy snímků také přibližně kolmé k základně a jedná se o obdobu normálního případu pozemní fotogrammetrie.

Letecká stereofotogrammetrie se používá pro mapování ve středním i velkém měřítku. Terén může být zvlněný (prostorově členěný), ale musí být nezarostlý (spolehlivé vyhodnocení průběhu terénu není možné například v souvislých lesních porostech). Vyhodnocení výškopisu v rovinatém terénu je obtížnější než u svažitého terénu (větší nejistota v nastavení měřické značky). Vyhodnocení se provádí na stereoskopickém modelu území v překrytové části dvojice snímků. Výsledkem je polohopis i výškopis mapy – tedy tři geodetické souřadnice  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

Pokud je polohopis i výškopis mapy získán při podrobném fotogrammetrickém mapování dvousnímkovou leteckou fotogrammetrií, jedná se o **univerzální metodu**.

### ➤ metody vyhodnocení

#### 1. jednoduché metody vyhodnocení

zcela zanedbáváme vliv prvků vnější orientace, vše řešíme jako normální případ (všechny snímky považujeme za ideálně svislé); malá přesnost vyhodnocení všech jednoduchých metod se udává nejistotou v určení výšek bodů **3 %** z výšky letu  $h$  (např. pro  $h = 2000\text{ m}$  to znamená  $6\text{ m}$ ); využití pouze pro průzkumné nebo interpretační práce (např. v lesnictví, zemědělství a vojenství); používají se přístroje bez korekčních zařízení:

- **kreslicí Stereometr (Zeiss)**

skládá se z čočko-zrcadlového stereoskopu a stereomikrometru; z měřených hodnot (čtení mikrometrického šroubu s přesností na  $0,02\text{ mm}$ ) lze vypočítat rozdíly horizontálních paralax a převýšení, resp. nadmořské výšky bodů; nebo je možné pokusit se o zákres čar stejných paralax (horizontál) vedením měřické značky na terénu; polohopis je dán levým snímkem a pouze se obkresluje; proměřovat lze jen pozitivy na papíře



- **Stereopantometr (Zeiss), Stereopret (Opton)**

jsou vylepšeny přídatným zařízením pro pohyb stereoskopu nad snímky, pro kresbu a pro prosvětlení negativů

- **Interpretoskop (Zeiss)**  
určen především pro interpretaci (čtení obsahu) snímků; k tomu účelu je vybaven dvěma pozorovacími systémy (pro vyhodnocovatele a dalšího odborníka v příslušném oboru); lze pozorovat snímky i z nerozřezaného filmového pásu; z měřených hodnot lze opět vypočítat rozdíly horizontálních paralax s přesností na  $0,02\text{ mm}$

## 2. přibližné metody

provádíme částečné opravy vlivu vnější orientace (nebo pracujeme s překreslenými snímky); používají se konstrukčně jednoduché přístroje; přesnost v určení výšek bodů se pohybuje mezi  $2-0,5\text{ ‰}$  z výšky letu  $h$  (např. pro  $h = 2000\text{ m}$  to znamená  $4\text{ až }1\text{ m}$ ); využití pro rychlé mapování rozsáhlých území v malých i středních měřítkách a pro průzkumné práce; používají se přístroje s korekčními zařízeními:

- **topografický stereometr STD – 2 (SSSR)**  
mechanická korekce měřených paralax; využití pro výškopisné mapování
- **Stereotop (Opton)**  
korekce pro paralaxy i snímkové souřadnice; vyhodnocuje se i polohopis
- **Stereokord G2, G3 (Opton)**  
připojen malý počítač pro řešení oprav
- **PA-2000 (Topcon)**  
moderní konstrukce využívající lineárních snímačů impulsů a výpočtu orientačních prvků na počítači

## 3. přesné metody

obnovujeme prvky vnitřní i vnější orientace (viz. snímkové orientace), provádíme přesné vyhodnocení polohopisu i výškopisu pro všechna měřítka; metody vyhodnocení jsou podobné jako v pozemní dvousnímkové fotogrammetrii:

### a) analogové – mechanicky

Na *analogových vyhodnocovacích strojích* obnovujeme středové promítání a vzájemné postavení snímků v prostoru, jaké bylo při jejich pořízení během snímkového letu (tzn. obnovujeme prvky vnitřní i vnější orientace) – snímky jsou v nosičích reálně natáčeny a nakláněny nebo se zavádějí opravy z vlivu prvků vnější orientace. Mechanickým řešením rovnic základních stereodvojic zjišťujeme *modelové souřadnice*, které mohou být po připojení kreslicího stolu s vlcovacím podkladem převedeny na *souřadnice geodetické* a přímo kresleny do *originálu mapy* (mechanické řešení podobnostní transformace do roviny 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.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kresba mapy se také přímo ryla hrotem do rycí vrstvy.

b) **analogové – 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*.

c) **analytické – početně**

Na *stereokomparátorech* měříme a do počítače registrujeme *snímkové souřadnice  $x'$ ,  $y'$*  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*.

d) **analytické – na analytických strojích**

V současné době 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. Vyhodnocení je možné *bodové i liniové*. Vzniká *vektorová kresba polohopisu a výškopis* je zaznamenáván ve formě **digitálního modelu terénu s poloautomatickým sběrem dat** – poloha měřické značky pro měření podrobných bodů je automaticky nastavována strojem v předem zvoleném *gridu* (sít bodů ve stejných vzdálenostech) a vyhodnocovatel pouze umísťuje značku pomocí stereoskopického vjemu ve správné výšce na terén.

e) **digitální**

Využíváme *analytické metody* pro digitální (nebo skenováním digitalizované) snímky vyhodnocované na počítačích – *digitálních fotogrammetrických pracovištích (stanicích) DPW (Digital Photogrammetric Workstation)*. Převod mezi *snímkovými a geodetickými souřadnicemi* je řešen pomocí *prostorové projektivní transformace* (pokud nejsou známy prvky vnitřní orientace, použije se DLT – *direktní lineární transformace*). Vyhodnocení může být *bodové i liniové*. *Polohopis* vzniká v podobě *vektorové kresby* a *výškopis* je zaznamenáván ve formě **digitálního modelu terénu s automatickým sběrem dat** (viz. tvorba digitálního modelu terénu). Pro dosažení vyšší přesnosti měření než je velikost jednoho pixelu v digitálním snímku je třeba použít *subpixelovou transformaci* (interpolací hodnot sousedních pixelů se dělí pixel na menší části a tím získáme subpixelovou polohu bodu uvnitř měřeného pixelu).

Pro vyvolání umělého stereoskopického vjemu v překryvové části dvojice digitálních snímků zobrazených na monitoru počítače se používá **epipolární transformace** – na základě *podmínky komplanarity* (viz. etapové řešení vnější orientace) převádí obecně orientované digitální snímky na normální případ a potom jsou vertikální paralaxy nulové. Neustále je přepočítáván pravý snímek tak, aby byl zachován stereoskopický vjem. Děje se tak v reálném čase a to pouze v okolí měřické značky (netransformuje se celý snímek, aby nevznikal velký objem nových dat, která by zabírala prostor na disku). Méně vhodným řešením je překreslení obou snímků kolineární transformací (v tomto případě ale nová, objemná data vznikají).



### ➤ Orientace stereoskopické dvojice snímků

V letecké fotogrammetrii, stejně jako v pozemní, jsou pro měřické snímky prvky vnitřní orientace známé. Přibližné hodnoty prvků vnější orientace se určují pomocnými zařízeními připojenými k letecké komoře během snímkového letu.

Postup orientace snímkové dvojice – příprava snímků na vyhodnocení:

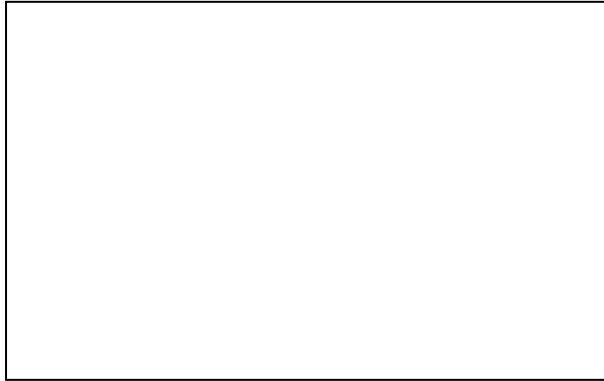
- 1) **Vnitřní orientace** – pomocí známých prvků vnitřní orientace obnovíme středové promítání, kterým snímky vznikly; postup je prakticky stejný jako v pozemní fotogrammetrii:
  - na analogovém vyhodnocovacím stroji nastavíme hodnotu konstanty komory a pomocí rámových značek dostředíme snímky v nosičích;
  - 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 o 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) Metody určení prvků **vnější orientace**:  
 V letecké fotogrammetrii nejsou ve většině případů prvky vnější orientace známé s dostatečnou přesností (především pro mapování ve velkém měřítku), a proto se musí před podrobným fotogrammetrickým vyhodnocením zpřesňovat pomocí *vlíčovacích bodů*. Pouze při měření systémy D-GPS nebo GPS/IMU, lze pro mapování ve středním měřítku považovat přesnost určení za dostatečnou (odpadá potom potřeba určování velkého množství vlíčovacích bodů v terénu) – tento postup se nazývá **přímé georeferencování snímků**.

Každá snímková dvojice má 12 prvků vnější orientace, které je potřeba zpřesnit – pro každý snímek jsou to 3 geodetické souřadnice středu vstupní pupily  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$  a 3 orientační úhly  $\kappa$ ,  $\varphi$ ,  $\omega$  (pootočení snímku ve vlastní rovině a dva sklony osy záběru) v okamžiku pořízení snímku.



a) **analogově – na mechanických strojích** (empiricky)

- **relativní orientace** – vzájemnou orientací obou snímků ve vyhodnocovacím stroji **odstraníme vertikální paralaxy** na šesti bodech podle **Gruberova schématu** (nemusejí to být vlíčovací body, stačí alespoň 5 orientačních – totožných bodů na obou snímcích); získáme stereoskopický vjem a obecně orientovaný prostorový model; je možné měřit modelové souřadnice;



- **absolutní orientace** – provedeme vlícování konstrukčního listu mapy na připojeném kreslicím stole (určení měřítka a horizontaci modelu), zjistíme tak návaznost prostorového modelu ve stroji na kreslicí stůl; potřebujeme nejméně 3 vlíčovací body se známými geodetickými souřadnicemi;

b) **analyticky – početně pro malé digitální fotogrammetrické stanice**

- **relativní orientace** – na bodech podle Gruberova schématu **měříme vertikální paralaxy** (nejsou potřeba vlíčovací body), následuje výpočet 5 neznámých prvků vnější orientace (z celkového počtu dvanácti)
- **absolutní orientace** – z měřených snímkových souřadnic a známých geodetických souřadnic minimálně 3 vlíčovacích bodů je podobnostní prostorovou transformací vypočteno zbývajících 7 neznámých vnější absolutní orientace – tzn. určíme 3 posunutí, 3 otočení a změnu měřítka modelu vzhledem k referenčnímu geodetickému systému nebo mapě;

c) **analyticky** – na analytických strojích nebo DPW

Nejprve **měříme snímkové souřadnice** vlíčovacích i podrobných bodů; následuje výpočet vnější orientace na počítači – možné jsou dva výpočetní postupy:

- **etapové řešení** – provádí se v krocích: **relativní orientace** na základě **podmínky komplanarity** – odpovídající si paprsky stereoskopické dvojice musí ležet v jedné rovině s fotogrammetrickou základnou, tj. v této rovině leží oba středy vstupních pupil, pozorovaný bod a obrazy tohoto bodu na snímcích; následuje **měřítkové připojení modelu a absolutní orientace s blokovým vyrovnáním** (prvky vnější orientace se určují pro každou snímkovou dvojici samostatně, následně se pomocí společných bodů v překrytu spojují do bloků a provádí se vyrovnání);

- **komplexní řešení** – relativní i absolutní orientace je provedena v jednom kroku: využívá přímého převodu snímkových souřadnic na geodetické, tzn. prostorové projektivní transformace **s vyrovnáním paprskových svazků** (známé prvky vnitřní orientace definují tvar paprskových svazků, vlíčovací body se známými geodetickými souřadnicemi jejich polohu a orientaci v prostoru, pokud je vlíčovacích bodů nadbytečný počet dochází k vyrovnání)<sup>2</sup>; spolu s prvky vnější orientace jsou určeny i souřadnice podrobných bodů; při výpočtu je řešena (podle počtu snímků v projektu) soustava až stovek tisíc rovnic iterací (postupným přibližováním ke správnému výsledku); jsou kladeny vysoké nároky na výpočetní techniku; toto řešení lze použít pro jednu snímkovou dvojici, řadu nebo celý blok snímků; možné je zpracovat libovolně orientované snímky (konvergentní i divergentní); komplexní řešení při relativní orientaci snímků se používá i v pozemní fotogrammetrii.



➤ **mapování univerzální metodou** – pracovní postup:

1. příprava (získání podkladů)

	<i>velká měřítko mapy</i>	<i>střední měřítko mapy</i>
2.	umělá signalizace vlíčovacích a případně také podrobných bodů	snímkový let
3.	snímkový let	výběr přirozeně signalizovaných vlíčovacích bodů na snímcích
4.	klasifikace snímků a místní šetření, měření přesahů střech	klasifikace snímků

5. podrobné fotogrammetrické vyhodnocení
6. doplňovací a revizní měření
7. kartografické zpracování a tisk

<sup>2</sup> Stejný princip se používá také v metodách analytické aerotriangulace (AAT).

## AD 5. podrobné fotogrammetrické vyhodnocení:

➤ **číselné vyhodnocení s registrací**

- odpovídá analogové nebo analytické početní metodě,
- vhodné pro velká měřítka od 1: 5000 a větší,
- vyhodnocení je možné pouze bodové – polohopisná i výškopisná kresba je převedena do jednotlivých bodů, každý bod má své identifikační číslo,
- registrují se modelové nebo snímkové souřadnice (číselný záznam vyhodnocení), které jsou následně transformovány do geodetického systému, registrace je ruční nebo automatická (pro vrstevnice),
- pokud současně vzniká grafický záznam na kreslicím stole má charakter přesného náčrtu (není výsledkem vyhodnocení),
- přesnost vyhodnocení je charakterizována střední chybou:

v poloze bodu u signalizovaných **16  $\mu\text{m}$**  v měřítku snímku (např. pro  $m_s = 4000$  to znamená **0,06 m**), u nesignalizovaných bodů má vliv především jejich zhoršená identifikace na snímku a střední chyba v poloze je **30  $\mu\text{m}$**  (např. pro  $m_s = 4000$  to znamená **0,12 m**),

ve výšce **0,15 ‰** z výšky letu  **$h$**  (např. pro  $h = 600$  m to znamená **0,09 m**), přesnost určení výšek do jisté míry závisí také na sklonu terénu – vhodnější je svažité terén, menší přesnosti je dosaženo v rovinnatém terénu.

Obecně lze tvrdit, že číselné vyhodnocení s registrací je možné použít až do měřítka mapy **1:1000**, tedy pro určení bodů s kódem charakteristiky kvality 3 (bývalá 3. třída přesnosti) –  $m_{XY} = 0,14$  m a  $m_H = 0,12$  m. Tento způsob vyhodnocení byl použit pro tvorbu Základní mapy velkého měřítka (ZMVM) v extravilánu a v intravilánu menšího významu.

➤ **analytické mapování**

- provádí se na analytických strojích nebo digitálních fotogrammetrických pracovištích (DPW),
- původně bylo určeno pouze pro fotogrammetrické zhušťování bodového pole, ovšem s rozvojem výpočetní techniky bylo umožněno využití i pro podrobné mapování, v současné době jde o nejpresnější řešení pro podrobné vyhodnocení analogových i digitálních snímků
- provádí se založení snímků do stroje nebo načtení digitálních snímků do projektu, zadání prvků *vnitřní orientace* a případné proměření rámových značek s určením opravy z vlivu srážky (u analogových nebo digitalizovaných snímků), následuje *vnější orientace* buď jako etapové nebo komplexní řešení, poté je možné *podrobné vyhodnocení* – polohopis v podobě vektorové kresby a výškopis se zaznamenává jako DMT (s poloautomatickým nebo automatickým sběrem dat)
- přesnost vyhodnocení je charakterizována střední chybou v poloze bodu na snímku **3-5  $\mu\text{m}$**  (např. pro  $m_s = 2000$  to znamená **0,01 m**), přitom se snímkové souřadnice odečítají na **1-0,5  $\mu\text{m}$** , přesnost ve výškách se udává **0,03 ‰** z výšky letu  **$h$**  (např. pro  $h = 600$  m to znamená **0,02 m**).

Omezení přesnosti letecké fotogrammetrie je potom dáno správnou identifikací (označením) měřeného bodu na snímku, nikoli přesností metody.

## 4.6. Digitální ortofoto a tvorba DMT

V současné době je digitální ortofoto nejvíce žádaným a užívaným produktem letecké fotogrammetrie. Stalo základní datovou vrstvou většiny geografických informačních systémů, je součástí státního mapového díla a slouží pro aktualizaci ZABAGED. Digitální modely terénu jsou výchozím způsobem uložení výškopisných dat v digitální podobě. Mohou být vytvářeny odvozením ze stávajících map, na základě souřadnic a výšek geodeticky určených bodů, fotogrammetricky nebo leteckým laserovým skenováním.

### ➤ princip metody digitálního ortofota

Na základě známé polohy a výšky každého pixelu v geodetickém systému souřadnic  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  (vyjádřené v podobě digitálního modelu terénu – DMT) odstraňujeme radiální posuny pomocí *nepřímé projektivní transformace rastru* – hledáme polohu a číselnou hodnotu pixelu na původním snímku pro jeho novou polohu ve vznikajícím ortofotu. Docílíme převodu středového průmětu snímku na pravoúhlé promítání mapy – *ortogonalizace snímku*.



Pro tvorbu ortofota je třeba mít k dispozici **digitální model terénu – DMT**, který v daném území buď již existuje, nebo musí být vytvořen:

- pokud již DMT existuje, je možné ihned pokračovat *nepřímou projektivní transformací jednotlivých snímků* (tvorbou ortofota)

nebo

- pokud DMT není k dispozici, je třeba nový DMT vytvořit zpracováním stereoskopické dvojice snímků – z měřených snímkových souřadnic a horizontálních paralax je vypočtena poloha i výšky pixelů měřického snímku v geodetických souřadnicích nad srovnávací rovinou. Digitální model terénu je možné vytvořit analytickým fotogrammetrickým mapováním:

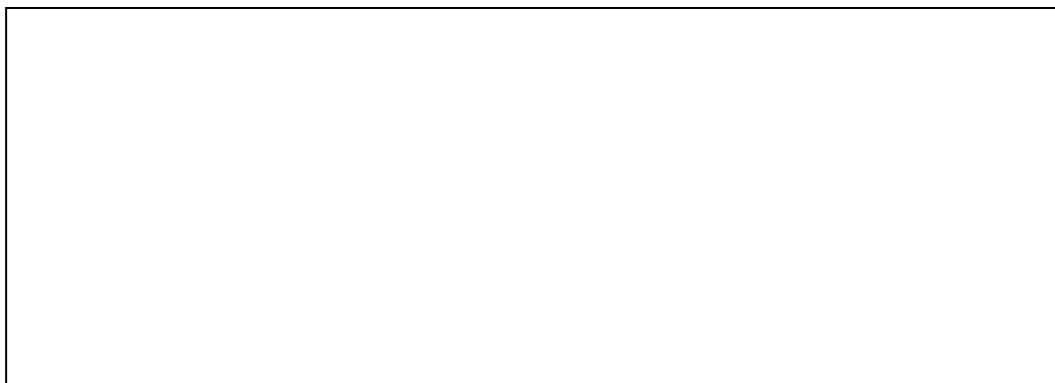
a) *na analytických strojích s poloautomatickým sběrem dat*

Měřická značka je polohově automaticky nastavována ve zvolené pravidelné síti bodů (gridu) a vyhodnocovatel ji pouze umísťuje prostorově na terén.

b) *na digitálních fotogrammetrických stanicích s automatickým sběrem dat*

Měření snímkových souřadnic a paralax počítač provádí samočinně nalezením totožných bodů na obou digitálních snímcích pomocí **obrazové korelace** (matematicky vyjádřená podobnost dvou obrazů). Vyhledávání totožných bodů se neprovádí pro celý obraz najednou, ale v posouvajícím se okénku velikosti několika pixelů.<sup>1</sup> Na velikosti okénka závisí rychlost zpracování DMT, kterou lze také zvýšit využitím *epipolární transformace*, tzn. převedením snímků na normální případ. Vertikální paralaxy jsou potom nulové a totožné body na obou snímcích leží v jedné řádce. Výpočet korelace, určení souřadnic, horizontální paralaxy a výšky bodu, se neprovádí pro každý pixel obrazu, ale v zadaném kroku (grid DMT), který se volí od jednoho po desítky metrů. Tím se také zvyšuje rychlost výpočtu. Výšky mezilehlých bodů se doplní interpolací.

Automaticky vytvořený DMT musí být ručně editován vyhodnocovatelem – za použití prostředků pro stereovidění se opravují **chybně umístěné body**, tak aby byl zachycen skutečný průběh terénu. Při automatické tvorbě obrazovou korelací je totiž model terénu generován i přes stavby, stromy a jinou vegetaci a současně s tím dochází interpolací k vyhlazení takto způsobené skokové změny výšky.<sup>2</sup>



Pro jednoduté plochy a plochy se stejnoměrným vzorem (vodní hladina, zasněžené oblasti, rovnoměrně osázená pole) **korelační techniky selhávají**, protože vzájemně podobných bodů je na levém a pravém snímku velké množství a nelze spolehlivě určit, které z nich jsou ve skutečnosti totožné.

<sup>1</sup> Velikost vyhledávacího okénka je volena v závislosti na největším převýšení v terénu, tj. největší horizontální paralaxě na snímcích.

<sup>2</sup> Pokročilé algoritmy pro tvorbu DMT obsahují filtry, které tyto chyby do značné míry odstraňují.

Na základě DMT vytvořeného jedním z uvedených způsobů provedeme **transformaci jednotlivých snímků** – transformovat lze jen oblast překrytového území, kde DMT vznikl. Na takto překreslených snímcích lze určovat tvar, velikost a polohu objektů stejně jako na mapě.

Transformací ortogonalizované snímky, **ortofotoplány** se většinou spojují do větších celků (např. podle kladu mapových listů), provádí se **maskování** a vytváří se **mozaika**. Na styčích snímků je třeba vyrovnat kontrasty a barevné rozdíly. Pokud se ještě doplní vektorová kresba (obsah katastrální mapy, vrstevnice, apod.) vzniká **ortofotomapa**.

Přesnost výsledného ortofota závisí především na výšce letu a měřítku pořizovaných snímků. Udáváná se hodnotou  $0,1\%$  z výšky letu  $h$ .

#### ➤ problémy tvorby digitálního ortofota

Zejména u vysokých budov vyvstává **problém radiálních posunů střech** (střechy neleží nad základem budov). Radiální posuny jsou totiž odstraněny pouze v úrovni zadaného modelu terénu a správně překreslen bude jen průnik objektu s terénem. Stěny a střechy budov zůstávají vlivem středového promítání snímku perspektivně zkreslené. Tato chyba se nejvíce projeví na okrajích snímků, kde jsou radiální posuny největší. Velmi pracná a nákladná ruční editace, při které se posouvají střech nad půdorysy budov jednotlivě, se v současné době již nepoužívá. Vhodnějším řešením je doplnit model terénu o model zástavby a transformaci snímků provést s ohledem na výškové členění budov. Na pravouhlý průmět je tak převeden spolu s terénem i obraz budov a radiální posuny střech jsou odstraněny. Vzniká tak **pravé ortofoto** (*true orthophoto*), které je vytvářeno především pro velká měřítka (1 : 5000 a větší).



V původním místě zobrazení střech tím ale vznikají prázdná místa a **problém zakrytých prostor**. Do prázdných pixelů po těchto prostorech může být vygenerován *rovnoměrný šum* (provedena retuš) nebo jsou převzaty *části ze sousedních snímků* v řadě – při mapování v intravilánu většinou mají snímky 80% překryt a jeden bod je zobrazen na více snímcích z různých úhlů pohledu (případně je možné využít snímků se šikmou osou záběru).

K rozdílům v poloze, které je třeba opravit, často dochází u mostů. Jejich poloha je totiž také nad digitálním modelem terénu (podobně jako u střech), a proto jsou **mosty radiálně posunuté** nad údolím. Chyby v poloze jsou zjevné především v případech, kdy je každá část mostu převzata z jiného snímku – poloviny mostu na sebe potom nenasazují.

➤ **integrovaná metoda** – diferenciální překreslení snímku

V letech 1950-1975 se ortofoto vytvářelo v rámci **integrované metody** opticko-mechanicky, **diferenciálním překreslím snímku** (překreslením po částech). V závislosti na přejíždění měřičkou značkou analogové stroje po stereoskopickém modelu v jednotlivých profilech, tedy na základě změny výšky terénu (obdoba DMT), bylo plynule měněno měřítko překreslovaného levého snímku. Snímek byl postupně kopírován pomocí malé štěrbin, která přejíždí v systému navazujících řádek. Výstupem výškopisu (na kreslicím stole) byly segmenty vrstevnic (vznikají tzv. bodování) nebo profilové šrafy, na jejichž základě bylo možné vrstevnice vytvořit. Diferenciální překreslovač se připojuje k analogovému vyhodnocovacímu stroji:

- **Topocart + Ortophot (Zeiss)**

V ČR byla integrovaná metoda využita pro tvorbu *Základní mapy velkého měřítka (ZMVM)* v 80. letech 20. stol. v extravilánu a intravilánu menšího významu – diferenciálně překreslený snímek sloužil jako polohopisný podklad pro 5. třídu přesnosti. Stejná metoda se používala také pro tvorbu tematických nebo účelových map (*Jednotná železniční mapa 1:1000* – tratě mezi stanicemi).



## 4.7. Snímkové triangulace

Snímkové triangulace umožňují určovat geodetické souřadnice bodů bodového pole metodami letecké fotogrammetrie. Fotogrammetrické zhušťování bodového pole je pro velká území ekonomicky výhodnější a rychlejší než geodetické zaměření. Nejčastěji jsou takto určovány *souřadnice vlíčovacích bodů* pro podrobné fotogrammetrické mapování.

Neznámými hodnotami jsou geodetické souřadnice *určovaných bodů* (nové body bodového pole nebo body vlícoavcí), zjišťované na základě známých souřadnic *výchozích bodů* (existující body bodového pole a další body o známých geodetických souřadnicích). Výsledky snímkové triangulace se také používají pro určení prvků vnější orientace před podrobným fotogrammetrickým vyhodnocením nebo pro spojování snímků do bloků před tvorbou digitálního modelu terénu a digitálního ortofota.

Pro snímkové triangulace lze využít snímků pořízených pro podrobné mapování nebo je použita **metoda dvojího náletu**, kdy se mapované území snímkuje podruhé s podélným překrytem 60% (získáme vhodnější základnový poměr) a případně také z vyšších letových hladin nebo s širším úhlem záběru (na snímku je pak zachyceno větší území).

### A/ Radiální triangulace

používala se jen pro rovinná území před mapováním kombinovanou metodu (jednosnímková letecká fotogrammetrie); výsledkem je pouze poloha bodů – geodetické souřadnice **X, Y**; jako výchozí jsou nutné alespoň dva body o známých souřadnicích (vhodnější je větší počet); přesnost je dostačující pouze pro mapy středních a malých měřítek

K vyhodnocení radiální triangulace se používají tzv. **radiální body**, pro které je osnova směrů na snímku stejná jako měřená v terénu – jsou to body, na které do určité míry nepůsobí radiální posuny (nadir, fokální bod, hlavní bod, střed snímku, centrální bod).

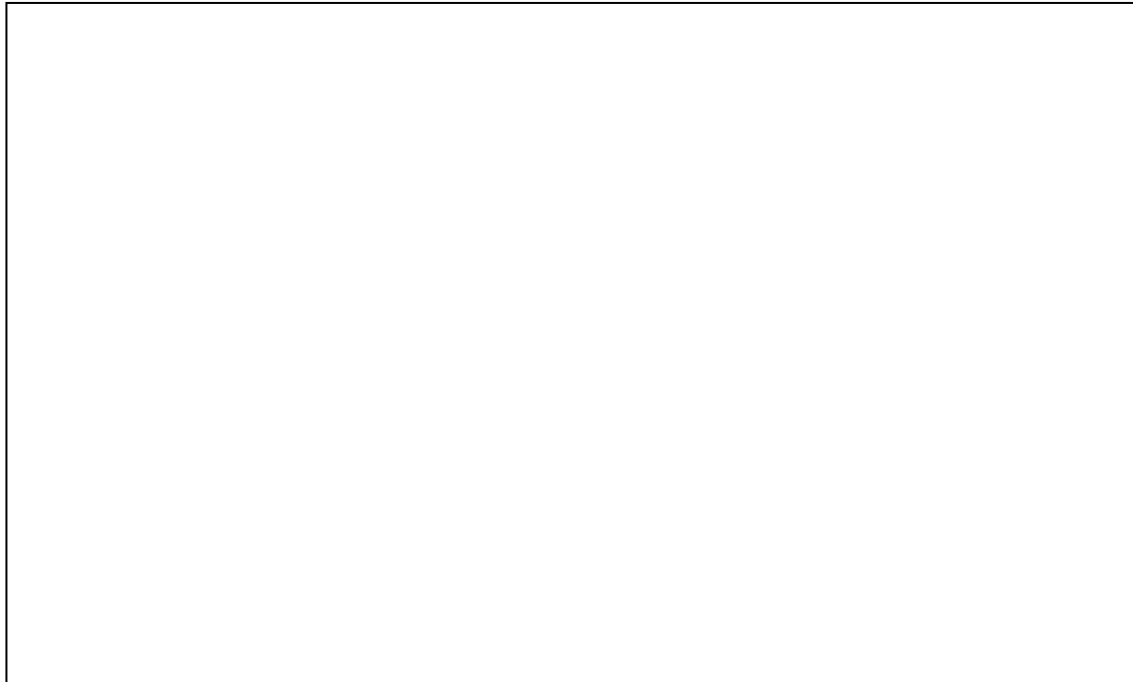
Podle způsobu řešení radiální triangulace rozlišujeme tyto metody:

- **početní** – na snímcích měříme přímo osnovu směrů nebo snímkové souřadnice; z výchozích a radiálních bodů vytvoříme vetknutý polygonový pořad a nové body určujeme protínáním vpřed;
- **grafická** – na konstrukční list se zobrazenými výchozími body o známých souřadnicích umísťujeme průsvitky s vykreslenými směry na body známé i určované; poloha nových bodů se vypíchne v jejich průsečících;
- **mechanická** – na konstrukčním listu s proraženými otvory v místech výchozích bodů provedeme montáž na kovové čepy čtvercových šablon s vysekanými otvory v místech radiálních bodů a ovály ve směrech osnovy; následuje mechanické vyrovnání vzniklých odchylek; poloha nových bodů v průsečících směrů se vyznačí do podkladu skrz duté čepy pikýrovací jehlou

V ČR se pro nízkou přesnost (do 1 mm v měřítku snímku) a výškovou členitost našeho území radiální triangulace využívala málo.

## B/ Aerotriangulace

V každé snímkové řadě řešíme prostorový polygonový pořad tvořený středy vstupních pupil všech snímků. Spojením řad do bloku vzniká trigonometrická síť. Výsledkem aerotriangulace jsou prvky *vnější orientace každého snímku* a *geodetické souřadnice nově určených bodů X, Y, Z*.



### ➤ metody aerotriangulace

#### 1. analogové aerotriangulace

prováděla se na *analogových strojích* (se symetrickým základnovým vozíkem a možností zkříženého pozorování snímků); u prvního snímku jsou požadovány 4 výchozí body a 2 u posledního v řadě; *poloha* nových bodů je zjištěna *graficky na připojeném kreslícím stole*, *výška* odečtena na *mechanickém počítadle*; určení se provádí pro každou snímkovou dvojici (stereoskopický model) samostatně nebo pro celou řadu snímků (metoda nezávislé dvojice – na počátku řady snímků, metoda připojení snímku – pro navazující snímky); přesnost určení polohy bodu se pohybuje kolem *0,1 mm* na konstrukčním listu mapy (tj. *1 m* pro měřítko *1:10 000*) – využití pro mapování ve středních a malých měřítkách;

#### 2. semianalytické aerotriangulace

na *analogových strojích* měříme a do připojeného počítače registrujeme modelové souřadnice výchozích i určovaných bodů; následuje *prostorová podobnostní transformace* do geodetického systému souřadnic; měření se provádí pro každou dvojici snímků (model) zvlášť; následně lze provést vyrovnání jedné řady nebo celého bloku snímků najednou; využití pro mapy středních měřítek;

### 3. analytické aerotriangulace (početní)

na přesném stereokomparátoru (nebo na analytickém stroji) měříme a do počítače registrujeme snímkové souřadnice výchozích i určovaných bodů; následuje prostorová projektivní transformace do geodetických souřadnic; nutné jsou alespoň 4 výchozí body pro celý blok snímků, vhodné jsou ale alespoň 3 body v každé řadě; takto určené body lze použít jako vlíčovací body i pro podrobné vyhodnocení map velkých měřítek; metoda se také využívá pro velmi přesné podrobné vyhodnocení na analytických strojích <sup>1</sup>

Do výpočtu vstupují známé prvky **vnitřní orientace**, přibližné hodnoty **prvků vnější orientace**, známé **geodetické souřadnice** výchozích bodů bodového pole a měřené **snímkové souřadnice** bodů výchozích i určovaných. Výsledkem jsou *přesné prvky vnější orientace* každého snímku a *geodetické souřadnice* určovaných bodů. Podle způsobu řešení výpočtu rozlišujeme tyto metody (viz. také metody určení prvků vnější orientace dvousnímkové letecké fotogrammetrie):

- **etapové řešení** – s blokovým vyrovnáním  
početní řešení provedené v jednotlivých krocích podobně jako u analogové aerotriangulace: připojujeme jednotlivé stereoskopické modely s vyrovnáním rozdílů na jejich stycích; vyrovnání může být prováděno v jednotlivých řadách nebo pro celý blok snímků (několik řad najednou) – tzv. **blokové vyrovnání**; potřebné jsou alespoň čtyři výchozí body (dva na začátku a dva na konci řady);  
pracovní postup: měření snímkových souřadnic, transformace do snímkových souřadnic prvního snímku pomocí rámových značek, relativní orientace (epipolární transformací na základě podmínky komplanarity – tj. připojení snímku), měřítkové připojení, absolutní orientace;
- **komplexní řešení** – s vyrovnáním paprskových svazků (*Bundle Adjustment*)  
poprvé použil r.1958 *H. Schmid* pro zhuštění sítě bodů na Měsíci;  
princip: bod v terénu, střed promítání a obraz tohoto bodu na snímku musí ležet na jedné přímce, tj. na promítacím paprsku – pro celý blok snímků najednou se provádí **vyrovnání paprskových svazků** bez mezikroků (bez rozdělení na relativní a absolutní orientaci); řeší se pomocí přímého převodu snímkových souřadnic na geodetické, tj. projektivní prostorovou transformací; pro každý snímek máme určit 6 neznámých prvků vnější orientace (případně také prvky vnitřní orientace) a dále 3 neznámé souřadnice každého určovaného bodu; řešíme velké množství rovnic (až stovky tisíc); pro výpočet jsou nutné alespoň přibližné hodnoty prvků vnější orientace; rovnice se řeší postupným přibližováním k výsledku – tzv. iterací; získáme geodetické souřadnice určovaných bodů a prvky vnější orientace pro všechny snímky najednou;

<sup>1</sup> Pokud nebyly určované body uměle signalizovány (při mapování ve středním měřítku), bylo možné před vlastním měřením použít pro jejich vyhledání *Interpretoskop* a pro vyznačení polohy laserovým paprskem přístroj *Transmark*.



- **komplexní řešení s podporou GPS/IMU (GPS/INS)**  
všechny prvky vnější orientace (poloha středu vstupní pupily  $X_0, Y_0, Z_0$  a úhly  $\kappa, \varphi, \omega$ ) jsou během snímkového letu určovány s vysokou přesností pomocí přijímačů GPS a inerciální měřící jednotky IMU (INS) – vnitřní přesnost měření GPS je  $0,05\text{ m}$  a určení polohy za letu spolu s inerciální jednotkou  $0,2\text{ m}$ ; naměřené hodnoty vstupují do výpočtu jako přibližné, výpočet je stejný jako v předchozím případě, ale vede rychleji ke správnému výsledku; pro mapování ve středním měřítku lze snímkový let provádět i bez vlíčovacích bodů a zpracování snímků bez aerotriangulace, ale pro kontrolu a zvýšení přesnosti je vhodné v mapovaném území zajistit alespoň několik bodů o známých souřadnicích;

#### 4. digitální aerotriangulace

analytická aerotriangulace prováděná na digitálních nebo skenováním digitalizovaných snímcích v počítači (DPW); při dalším zpracování neplatí mechanická omezení přesnosti analytického stroje nebo stereokomparátoru ( $1\ \mu\text{m}$ );

rozlišovací schopnost skeneru dosahuje až  $3\ \mu\text{m}$  (velikost prvků CCD), z důvodu narůstajícího objemu dat se letecké snímky digitalizují na velikost pixelu nejvýše  $12\ \mu\text{m}$ ; požadované centimetrové přesnosti v geodetických souřadnicích pak bývá docíleno subpixelovou transformací (odečítání polohy bodu na snímku na  $0,05$  pixelu),

postup zpracování: načtení snímků a textových souborů se seznamy souřadnic rámových značek, prvků vnitřní orientace, geodetických souřadnic výchozích bodů a přibližných prvků vnější orientace, automatická vnitřní orientace (vyhledání rámových značek obrazovou korelací – porovnání se vzorem), dále systém navrhne polohu nových určovaných bodů s rozložením podle Gruberova schématu nebo vyhledá uměle signalizované vlíčovací body (opět porovnání se vzorem); většinou je nutné první tři body určit ručně nebo provést výběr z navržené skupiny bodů; následuje vlastní výpočet komplexního řešení aerotriangulace; přesnost určení nových bodů je  $1-4\ \mu\text{m}$  ve snímkových souřadnicích (např. pro  $m_s = 2000$  to je méně než  $0,01\text{ m}$ );

## ➤ Postup určování souřadnic ve fotogrammetrii

### I/ Aerotriangulace

Na základě bodů daných (např. body bodového pole) o známých geodetických souřadnicích zjišťujeme geodetické souřadnice bodů určovaných – nejčastěji vlíčovací body pro podrobné mapování.

Do výpočtu vstupují známé prvky vnitřní orientace, přibližné hodnoty prvků orientace vnější, známé geodetické souřadnice výchozích bodů bodového pole a měřené snímkové souřadnice bodů výchozích i určovaných. Výsledkem jsou přesné prvky vnější orientace každého snímku a geodetické souřadnice určovaných bodů.

### II/ Podrobné mapování

- 1) Snímkové orientace – příprava dvojice snímků před vyhodnocením:
  - a) pro vnitřní orientaci potřebují známé prvky vnitřní orientace (obnovujeme středové promítání)
  - b) pro relativní vnější orientaci postačují body identické – totožné na levém a pravém snímku, tj. 6 bodů rozložených v překrytovém území podle Gruberova schématu (nemají geodetické souřadnice, slouží pro odstranění vertikálních paralax)
  - c) pro absolutní vnější orientaci snímků potřebují minimálně 3 vlíčovací body se známými geodetickými souřadnicemi (určeny geodeticky nebo metodou aerotriangulace)

Na základě známých geodetických souřadnic a měřených snímkových souřadnic vlíčovacích bodů je určen jejich vzájemný převod. Vlíčovací body mají význam identických (nosných) bodů transformace pro určení transformačního klíče.

- 2) Podrobné fotogrammetrické vyhodnocení

Z měřených snímkových souřadnic určovaných podrobných bodů lze následně určovat jejich souřadnice geodetické.

## ➤ Rozlišení pojmů vlíčovací a identický bod

Vlíčovací má vždy známé geodetické souřadnice – slouží jako identický (nosný) bod pro určení transformačního klíče.

Identickým bodem se ale také rozumí bod totožný (stejný na levém a pravém snímku) – potom geodetické souřadnice nemá.

## 4.8 Vyhodnocovací přístroje a systémy pro leteckou fotogrammetrii

Přístrojová technika a počítačové systémy pro vyhodnocení snímků letecké fotogrammetrie jsou obdobné jako v případě fotogrammetrie pozemní. Pro dvousnímkové metody je ale nutné provést zpřesnění prvků vnější orientace, jejichž hodnoty byly přibližně určeny pomocnými zařízeními během snímkového letu. Při mapování ve velkém měřítku je k tomuto účelu nutné zajistit dostatečný počet uměle signalizovaných vlíčovacích bodů se souřadnicemi určenými geodeticky nebo snímkovou triangulací. Pro střední měřítko mapy bývá vlíčovacích bodů méně a jsou signalizovány většinou přirozeně. Případně je možné považovat prvky vnější orientace určené během snímkového letu inerciální jednotkou GNSS/IMU, resp. GNSS/INS za dostatečně přesné i bez použití vlíčovacích bodů (příp. mají takovéto body pouze kontrolní funkci). Prvky vnitřní orientace jsou ve většině případů (pro měřické snímky) známé nebo je lze při nadbytečném množství vlíčovacích bodů zahrnout mezi určované hodnoty.

### ➤ přístroje pro jednosnímkovou leteckou fotogrammetrii

Překreslení snímku se dříve provádělo *opticko-mechanicky* pomocí přístroje nazývaného **překreslovač** (např. *Zeiss SEG I* a *Rectimat-C* nebo *Opton SEG 6*). Používané byly také *metody opticko-grafické* pro obkreslení obsahu snímku do mapy pomocí **obreslovače** a *metody grafického vyhodnocení* bez použití přístrojové techniky – viz kapitola 4.4.

V současné době se provádí **překreslení digitálního snímku kolineární rovinnou transformací rastru** na počítačích. Výsledkem překreslení je **fotoplán**.

### ➤ přístroje pro dvousnímkovou leteckou fotogrammetrii

Přístrojová technika pro vyhodnocení metodami letecké stereofotogrammetrie se dělí podle možnosti řešit prvky vnější orientace:<sup>1</sup>

#### a) jednoduché metody vyhodnocení

Prvky vnější orientace neuvažujeme vůbec. Snímky jsou pouze vzájemně orientovány ve vlastní rovině pro získání umělého stereoskopického vjemu (odstranění vertikálních paralax orientací snímků podle základny – středy obou snímků a jejich obrazy na snímku sousedním musejí ležet na jedné přímce). Používané jsou konstrukčně jednoduché přístroje, které umožňují z měřených hodnot vypočítat rozdíly horizontálních paralax a dále také výškové rozdíly terénu (převýšení), případně nadmořské výšky bodů (pokud má alespoň jeden bod známou nadmořskou výšku). Některá zařízení umožňují pro zobrazení výškopisu vykreslovat místo vrstevnic horizontály (linie se stejnou hodnotou horizontální paralaxy). Polohopis je dán obsahem levého snímku a může být obkreslen. Přesnost jednoduchých metod vyhodnocení je nízká, a proto jsou vhodné pouze pro průzkumné nebo interpretační práce.

<sup>1</sup> Přístroje pro jednoduché a přibližné metody vyhodnocení již byly popsány v kapitole 4.5.

Přístroje se skládají z *čočko-zrcadlového stereoskopu* pro vznik umělého stereoskopického vjemu a zařízením pro měření bývá *stereomikrometrický šroub*. Příkladem takovýchto přístrojů je *Zeiss kreslící Stereometr, Stereopantometr, Interpretoskop* nebo *Opton Stereopret*.

#### b) *přibližné metody vyhodnocení*

Přístroje pro přibližné vyhodnocení jsou podobné předchozím, ale přidané jsou mechanické součásti nebo elektronika pro řešení opravy vlivu prvků vnější orientace na měřené hodnoty. Umožňují vyhodnocovat polohopis, výškopis v podobě vrstevnic nebo měřit výšky bodů. Využívat se mohou pouze pro torbu map středních a malých měřítek. Jsou to např.: **topografický stereometr STD – 2** (SSSR), *Opton Stereotop, Stereokord G2, G3* nebo *Topcon PA-2000*.

#### c) *přesné metody vyhodnocení*

Protože přístroje pro přesné vyhodnocení umožňují obnovit prvky vnitřní i vnější orientace snímkové dvojice, lze pomocí nich přesně určovat polohu i výšku vyhodnocovaných bodů v prostoru. Jak již bylo řečeno, prvky vnitřní orientace jsou pro měřické snímky známé, a proto je stačí pouze nastavit a obnovit tak středové promítání, kterým snímky vznikly (viz postup při *vnitřní orientaci snímků*). Metody určení, resp. zpřesnění prvků vnější orientace (relativní a absolutní) již byly popsány v kapitole 4.5 a liší se podle zvolené stereofotogrammetrické metody a použitého přístroje (viz postup při *vnější orientaci snímků*).

#### ➤ **analogové stroje**

Analogové stroje vytvářejí analogii (obdobu) postavení obou snímků v prostoru, jaké bylo při jejich pořízení v terénu, a tím jsou současně řešeny prvky vnější orientace. Dělí se podle způsobu, kterým je analogie vytvářena na přístroje s projekcí optickou a skutečným nebo neskutečným stereoskopickým modelem, s mechanickou projekcí a prostorovými řídicími tyčemi nebo dvěma páry pravítek umístěnými ve dvou rovinách a s opticko-mechanickou projekcí:

- *přístroje s optickou projekcí*
  - *skutečný stereoskopický model*  
*Zeiss Multiplex, Opton DP-1, 2, 3*
  - *neskutečný stereoskopický model*  
*Zeiss Stereoplanigraf, Topoflex*
- *přístroje s mechanickou projekcí*
  - *prostorové řídicí tyče*  
*Zeiss Stereometrograf, Wild Autograf A-5, 6, 7, 8, 9, 10*
  - *pravítka ve dvou rovinách*  
*Zeiss Topokart*

– *přístroje s opticko-mechanickou projekcí*

*Nistri Fotostereograf Beta (Itálie)*

Vzhledem k tomu, že se analogové přístroje v praxi již nepoužívají, má uvedený přehled pouze informativní charakter a není třeba uvádět jejich bližší parametry.

Vyhodnocení *analogovou metodou (grafické nebo číselné)* se provádělo buď s grafickým záznamem na kreslicím stole (bodové i liniové vyhodnocení), nebo s číselným záznamem souřadnic (jen bodové vyhodnocení), které byly registrovány na záznamové médium a později do počítače (viz *číselné vyhodnocení s registrací – kapitola 4.5*). Výškopis vznikal přímou kresbou vrstevnic do připraveného konstrukčního listu mapy nebo tzv. bodováním.

➤ **monokomparátory, stereokomparátory a digitální komparátory**

Tato zařízení jsou určena pro měření snímkových souřadnic a paralax jak v letecké, tak v pozemní fotogrammetrii. Využívají se v *analytických početních metodách*. Vyhodnocení je velice přesné, ale pouze bodové (rovněž viz *číselné vyhodnocení s registrací – kapitola 4.5*). Výčet a bližší popis těchto přístrojů je v kapitole 3.7.

➤ **analytické stroje (Analytical Plotters)**

Analytické stroje byly původně navrženy především pro *aerotriangulaci* a později začaly být používány také pro *podrobné vyhodnocení* snímků letecké fotogrammetrie. V dalších letech díky rozšíření výpočetní techniky se staly běžné i pro zpracování snímků pozemních. Protože se orientace i vyhodnocení snímků řeší početně, stroje v podstatě nejsou omezeny velikostí konstanty použité komory nebo sklony snímků, které mohou být téměř libovolné (záleží pouze na podmínkách pro zachování stereoskopického vjemu – pokud má být použit).

Analytické stroje jsou nejpřesnější zařízení pro vyhodnocení analogových (nedigitalizovaných) snímků – *analytická metoda na analytických strojích*. Polohopis vzniká v podobě vektorové kresby a výškopis ve formě DMT s poloautomatickým sběrem dat (viz *analytické mapování – kapitola 4.5*). Zajímavou možností je *superimpozice* – tj. zobrazení kresby zpět do snímků pro kontrolu vyhodnocení. Výčet a vlastnosti analytických strojů jsou uvedeny rovněž v kapitole 3.7.

➤ **digitální fotogrammetrická pracoviště**

*DPW – Digital Photogrammetric Workstation*

Počítače vybavené vhodným softwarem, hardwarovými doplňky pro stereovidění a dvouruční vícetlačítkovou fotogrammetrickou myš nebo ročními koly a nožním kotoučem (s rotačními snímači impulzů) pro ovládání měřické značky se začaly nejprve používat pro vyhodnocení leteckých snímků digitalizovaných z filmových pásů skenováním. Od roku 2001 jsou pořizovány také snímky digitálními leteckými komorami. Za dalších deset let se skenování dostává na ústup a začínají převládat přím digitální obrazová data.



Pro podrobné vyhodnocení se využívá analytických metod dvousnímkové fotogrammetrie s digitálními snímky zobrazenými na monitoru počítače. Princip **digitálního vyhodnocení** je stejný jako při použití analytického stroje. Jedná se rovněž o **analytické mapování** – polohopis je vyhodnocován v podobě vektorové kresby a výškopis ve formě DMT (možný je plně automatický sběr výškových dat s využitím obrazové korelace v překrytovém území snímkové dvojice) viz kapitola – 4.5.

Krom toho DWP umožňují provádět digitální (analytickou) **aerotriangulaci** – viz kapitola 4.7 nebo vytvářet **digitální ortofoto** – viz kapitola 4.6.

Vyhodnocení na takto vybavených počítačích dosahuje v závislosti na kvalitě a rozlišení použitých snímků vysoké přesnosti – měření snímkových souřadnic pomocí *subpixelové transformace* s odečtem na  $\mu\text{m}$  a jejich zlomky (poloha bodu je určována uvnitř pixelu), výsledná přesnost souřadnic bodu v měřítku snímku se pohybuje mezi 1-5  $\mu\text{m}$ , při nízkých výškách letu (cca 200-500 m) a větším měřítku snímku lze dosáhnout určení bodu na terénu s centimetrovou přesností (dostačující pro mapování ve velkém měřítku nebo zhušťování podrobného bodového pole).

V pozemní fotogrammetrii jsou počítače využívány také pro vyhodnocení snímků se sbíhajícími se osami záběru průsekovou metodou bez využití stereoskopického vjemu.

**Malá digitální fotogrammetrická pracoviště** jsou počítače s jednodušším a levnějším vybavením pro stereoskopické vidění. Také programové vybavení většinou poskytuje při vyhodnocení menší možnosti. Umožňují ale provádět základní úlohy dvousnímkové fotogrammetrie (orientace snímků, jejich podrobné vyhodnocení, případně i snímkové triangulace).

Příklady digitálních fotogrammetrických pracovišť již byly uvedeny v kapitole 3.7 a softwarové vybavení bylo zmiňováno i v kapitole 3.6.

## Literatura

### ➤ Středoškolské učebnice (tematicko-chronologické řazení)

- HERMANY, J. a PICHÍK, V.: *Fotogrammetrie : učebnice pro 3. a 4. ročník středních průmyslových škol zeměměřických*. Praha : Kartografie, 1975.
- ŠMIDRKAL, Josef: *Fotogrammetrie : pro 3. ročník studijního oboru Geodézie*. Praha : Geodetický a kartografický podnik v Praze, 1986.
- MENŠÍK, Miroslav: *Geometrické základy kartografie a fotogrammetrie : pro 2. ročník průmyslové školy zeměměřické*. Praha : Studijní a informační ústav odborného školství, 1955.
- KRIEGELSTEIN, Eduard a KRIEGELSTEIN, Martin: *Deskriptivní geometrie 2 : pro 2. ročník středních průmyslových škol studijního oboru Geodézie*. Praha : Geodetický a kartografický podnik v Praze, 1988.

### ➤ Vysokoškolské učebnice a skripta (tematicko-chronologické řazení)

- *České vysoké učení technické v Praze:*

- PAVELKA, Karel: *Fotogrammetrie 10*. 1. vyd. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 1998. ISBN 80-01-01863-6.
- PAVELKA, Karel: *Fotogrammetrie 10*. 2. přeprac. vyd. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2003. ISBN 80-01-02649-3.
- PAVELKA, Karel: *Fotogrammetrie 20*. 1. vyd. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 1998. ISBN 80-01-01712-5.
- PAVELKA, Karel: *Fotogrammetrie 20*. 2. přeprac. vyd. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2003. ISBN 80-01-02762-7.
- PAVELKA, Karel , DOLANSKÝ, Tomáš , HODAČ, Jindřich a VALENTOVÁ, Miluše: *Fotogrammetrie 30 : Digitální metody*. 1. vyd. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2001. ISBN 80-01-02413-X.
- DVOŘÁČEK, Petr , JURÁŠKOVÁ, Renata a RŮŽEK, Miroslav: *Fotogrammetrie 10, 20 : Cvičení*. 1. vyd. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 1997. ISBN 80-01-01566-1.
- PAVELKA, Karel , RŮŽEK, Miroslav, aj.: *Fotogrammetrie 10, 20 : Praktická cvičení*. 1. vyd. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2003. ISBN 80-01-02655-8.
- PAVELKA, Karel: *Fotogrammetrie 1*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2009. ISBN 978-80-01-04249-6.

- PAVELKA, Karel: *Fotogrammetrie 2*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04719-4.
  - PAVELKA, Karel a HODAČ, Jindřich: *Fotogrammetrie 3 : Digitální metody a laserové skenování*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2008. ISBN 978-80-01-03978-6.
  - PAVELKA, Karel, aj. *Fotogrammetrie 1, 2 : Praktická cvičení*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2007. ISBN 978-80-01-02655-7.
- *Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava:*
- BÖHM, Jozef: *Fotogrammetrie : učební texty* [online]. Ostrava : Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2002 [cit. 30. dubna 2008]. Dostupné na: <<http://igdm.vsb.cz/igdm/materialy/Fotogrammetrie.pdf>>.
  - KAPICA, Roman: *Fotogrammetrie : Návod do cvičení I, II* [online]. Ostrava : Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2009 [cit. 8. září 2009]. Dostupné na: <<http://kapica.ic.cz/fotogrammetrie.html>>. ISBN 978-80-248-2067-5.
- *Univerzita Karlova – Přírodovědecká fakulta:*
- ČAPEK, Richard , MIKŠOVSKÝ, Miroslav a MUCHA, Ludvík: *Geografická kartografie*. Praha : Státní pedagogické nakladatelství, 1992. ISBN 80-04-25153-6.

## ➤ Další monografie

- BAATZ, Willfried: *Fotografie*. Přel. Kalabišková, Hana. Brno : Computer Press, 2004. ISBN 80-251-0210-6.
- BOGUSZAK, František a ŠLITR, Jaroslav: *Topografie*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1962.
- GÁL, Pavel: *Fotogrametria*. Bratislava : Štátne nakladateľstvo technickej literatury, 1954.
- GÁL, Pavel: *Fotogrametria*. 2. přeprac. vyd. Bratislava : Slovenské vydavateľstvo technickej literatury, 1965.
- HÁNEK, Pavel: *Data z dějin zeměměřictví : 25 tisíc let oboru*. Praha : Klaudian, 2012.
- HLAVÁČ, Ludovít: *Dějiny fotografie*. Martin : Osveta, 1987.
- JERÁBEK, Ondřej a LEDVINKA, Vladimír: *Čtení leteckých a pozemních snímků : Základy fotogrammetrie*. Praha : Naše vojsko, 1959.

- JIRÁČEK, M. , HÁLOVÁ, A. a MORÁVEK, J.: *Fotografický slovník*. Praha : Orbis, 1955.
- KONŠIN, M. D.: *Letecká fotogrammetrie*. Překlad VÚGTK. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1957. Přeloženo z ruského originálu *Aerofototopografia*. Moskva : Geodezizdat, 1954.
- KOUNOVSKÝ, J.: *Theoretické základy fotogrammetrie*. Praha : Jednota československých matematiků a fyziků, 1948.
- MENŠÍK, Miroslav: *Fotogrammetrie praktická*. Praha : Jednota československých matematiků a fyziků, 1948.
- MENŠÍK, Miroslav: *Geometrické základy fotogrammetrie*. Praha : Státní pedagogické nakladatelství, 1966.
- MURDYCH, Zdeněk: *Dálkový průzkum Země*. Praha : Československá akademie věd, 1985.