

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 pravoúhlý průmět mapy nebo plánu.¹



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)

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

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 – velikost předmětů se při fotogrammetrickém vyhodnocení mapy ze snímků zvětšuje. 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 nanesena 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*

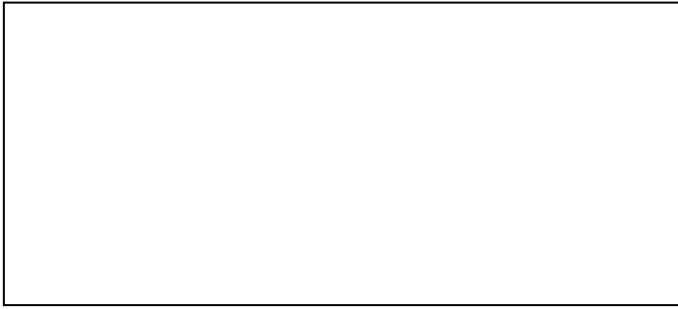
b) **film** – dnes používanými filmovými materiály jsou *polyestery*,² např. PET – polyethylentereftalát (C₂H₄)_n – obtížně hoří a je téměř beze srážky, používá se v tloušťce 0,1-0,3 mm;

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

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

hlavní použití papírových podložek ⇒ *pozitiv, kontaktní kopie nebo zvětšenina*

² 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)**³ – 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 *přídavných látek* (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 procesu vyvolání se v ustalovači 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']⁴

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']⁵

e) **praní** – dochází k odplavení zbytků rozpuštěného bromidu stříbrného a dalších chemických látek z citlivé vrstvy 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)

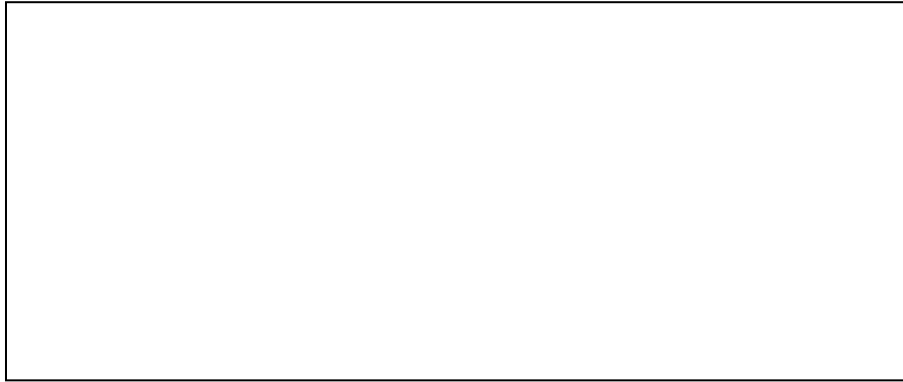
⇒ vzniká **trvalý viditelný negativní obraz**

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

³ 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*.

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

⁵ 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 vyšší číslo stupnice, tím větší je citlivost materiálu.
- Čím větší citlivost, tím kratší expozice (osvit) je možné za stejných světelných podmínek volit.
- Čím horší jsou světelné podmínky (méně světla přichází z vnějšího prostředí do komory), tím je třeba volit vyšší citlivost materiálu nebo delší expozici je třeba 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.⁶

9 DIN = 6 ISO
15 DIN = 25 ISO
21 DIN = 100 ISO
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)

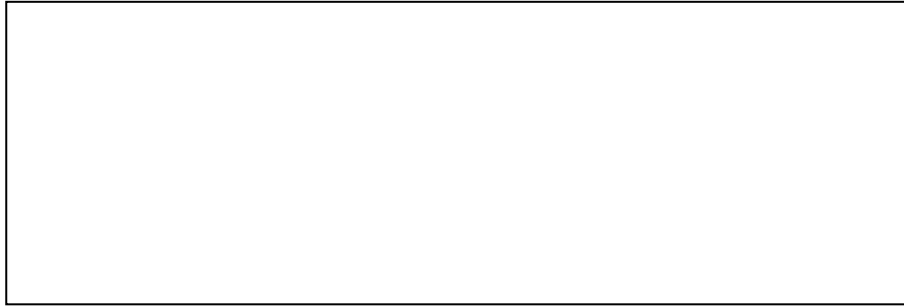
Lidské oko rozliší na černobílém snímku přibližně 16 odstínů šedi. Proto je méně vhodný pro interpretaci (čtení obsahu) snímku nebo zjišťování druhových a stavových veličin. Používá se v případech, kde je třeba určit pouze geometrické vztahy (tvar, velikost a polohu). Snímkování na černobílé materiály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

⁶ 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, využití pro geologii, atd.). V letecké fotogrammetrii 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.

➤ **spektrozonální snímky (*False colour*)**

Obraz je tvořen dvěma uměle obarvenými vrstvami (modrými a červenými pigmenty): panchromatická a infračervená vrstva. 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.⁷



⁷ 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. Umisťují 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 snímání 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) osvitě dochází k podexponování snímku – na křivce vymezuje *oblast podexpozice*. Při delším (nadměrném) osvitě 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 osvitěm 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 (může být způsoben dlouhotrvajícím nebo nevhodným skladováním fotografického materiálu).

Velikost *gradace* γ je dána tangencí úhlu α , který svírá prodloužení přímkové části přímky s osou expozice.⁸ 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 milimetr* (‘/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) na vyvolaném snímku určuje rozlišovací schopnost materiálu.⁹



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.¹⁰

⁸ Vyjadřuje strmou částí přímkové části senzimetrické křivky pomocí směrnice této přímky.

⁹ Kromě čárových se používají i kruhové testy.

¹⁰ Výsledné rozlišení snímku závisí do značné míry i 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 snímku. Její výskyt a velikost závisí na použité podložce, ale srážet se může i citlivá vrstva, která při vyvolání a následném praní silně nabobtnává.

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;¹¹
- *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 (plochý) film nebo skleněné fotografické desky obdélníkového formátu založené ve světlotěsných kazetách, pořizují se jednotlivé snímky, výjimečně lze snímkovat i na filmové pásy (svitkový film)

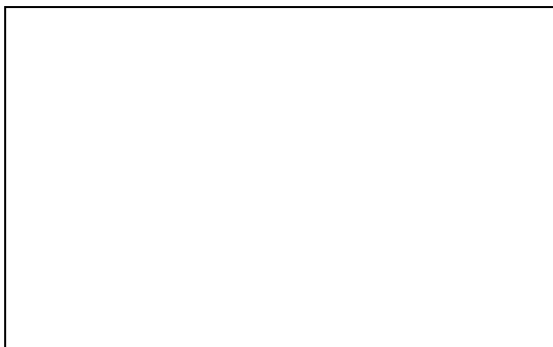


- standardní rozměry snímku jsou: **13x18 cm** a někdy se používá též 9x12 cm

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

¹¹ 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:
 - 18 x 18 cm (šířka pásu 20 cm),
 - 23 x 23 cm**, tj. 9“ x 9“ (šířka pásu 25 cm),
 - 30 x 30 cm (šířka pásu 32 cm).¹²

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

¹² Formát 18 x 18 cm byl používán v ČR ještě v 60. a 80. letech 20. století. Od 80. let se stal běžný formát 23 x 23 cm. Formát 30 x 30 cm nebyl v ČR používán.

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 pro pořizování digitálních obrazových dat (nejprve vojenské a poté i civilní družicové systémy pro DPZ s mechanickými a později elektronickými 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 digitálního snímkování 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), při změně jedné veličiny dochází i ke změně ostatních.



➤ 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 během provozu

➤ **Nevýhody:**

- vzniká velký objem dat
- problém s výrobou velkých přesně uspořádaných matic čidel (senzorů)¹³
- 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 1bitové, 8bitové a 24bitové kódování obrazu (tato tři jsou nejpoužívanější); zvolné kódování má zásadní vliv na celkovou velikost obrazového souboru¹⁴
- *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 systému¹⁵
- *barevný systém RGB* – pro vyjádření úrovně každé ze tří základních barev (R-red, červená, G-green, zelená, B-blue, modrá) je použito 8bitové kódování, barva jednoho pixelu je tedy zapsána celkem 24 bity; získáváme tzv. pravé barvy (*True Colour*);¹⁶ systém RGB se nejvíce používá v digitální fotografii a pro zobrazování na počítačích¹⁷
- *vícépásmový obraz* (multispektrální) – vzniká, pokud pořizujeme obrazové záznamy ve více spektrálních pásmech (tj. v různých částech spektra), 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 ($1'' = 25,4 \text{ mm}$); u skenerů se rozlišení udává také velikostí jednoho čidla v řádce v μm ; pro obrazové záznamy DPZ (dálkového průzkumu Země), rozlišení leteckých snímků nebo ortofota se uvádí velikost jednoho pixelu ve skutečnosti (např. 1 pixel odpovídá na zemském povrchu ploše 10 x 10 m) – označuje se zkratkou *GDS (Ground Sample Distance)*

¹³ 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.

¹⁴ Pokud vynásobíme počet všech pixelů v obraze počtem bitů potřebných pro vyjádření barvy jednoho pixelu, získáváme velikost nekomprimovaného obrazového souboru.

¹⁵ 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).

¹⁶ 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.

¹⁷ 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 určených pro uložení obrazových rastrových dat) je velké množství. Běžně používaných je ale jen několik:¹⁸

- 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. zjednodušení informace o intenzitě barev); v obraze se provedou neodstranitelné změny, po dekompresi nezískáme původní data

Kompresní poměr je poměr objemu dat komprimovaného a nekomprimovaného obrazového souboru – udává míru zmenšení množství dat.¹⁹

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** se nepoužívá pro obrazy větších rozměrů. Objemy dat bez komprese, při zachování plné barevnosti, totiž mohou být obrovské. Formát **PNG** umožňuje ukládat plně barevné obrazy, ale často se používá i 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 (např. map nebo textů), tj. obrazů s prudkými barevnými přechody (barevnými hranami) nebo velkých obrazů 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.

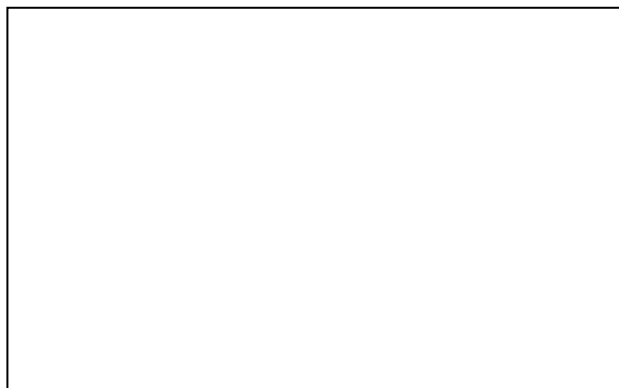
¹⁸ Pro zjednodušení je v textu uvedeno označení obrazového formátu shodné s koncovkou (příponou) obrazového datového souboru.

¹⁹ 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*).²⁰

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 zachycení 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*. Jejich citlivost k barvám (tzn. k různým vlnovým délkám) musí být upravena pomocí filtrů tak, aby reagovaly pouze na oblast viditelného spektra (380 – 720 *nm*). Při expozici na čidlech vzniká elektrický náboj, který je následně přenesen do registru v podobě analogového signálu zesílen, digitalizován a uložen.²¹
- **CMOS** prvky (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) pracují na bázi tranzistoru; oproti CCD mají výrazně nižší spotřebu elektrické energie (1%), jsou menší a výroba je levnější (o 80%), mohou mít ale nižší a nestejnou citlivost (obecnou i k barvám).²²
- **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.

²⁰ Podobný proces vzorkování se používá při digitalizaci nejrůznějších analogových signálů (např. zvukových).

²¹ Předávání sdružených nábojů mezi čidly až do registru je využíváno u čipů s tzv. progresivním skenem.

²² 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 pak 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 $3\text{--}10 \mu\text{m}$.
 - Zásadním problémem je přesné sestavení velkých matic prvků CCD (uspořádání do řádek a sloupců a jejich správná orientace) nebo také současné odečtení a rychlé uložení velkého množství pořízených dat.²³ Extrémně velké matice prvků CCD je technologicky velice náročné sestavit.²⁴
 - Jestliže použijeme skenování analogového snímku s nejvyšším rozlišením (tzv. na zrno, $150' / mm$, tj. 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 $23 \times 23 \text{ cm}$ 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 pro pořízení digitálních obrazových dat 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 11.000×15.000 pixelů (165 Mpix). Druhou možností je použití velkých přesně uspořádaných čipů (matic prvků CCD) o rozměrech až 7.168×4.096 prvků (29 Mpix). 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*).²⁵

²³ U měřických snímků požadujeme vnitřní přesnost v poloze bodu cca $1 \mu\text{m}$. Se stejnou přesností provádíme i měření snímkových souřadnic.

²⁴ První digitální komory určené pro leteckou fotogrammetrii, které mohou s dostatečnou přesností nahradit celé obrazové pole klasického snímku $23 \times 23 \text{ cm}$ jedním snímačem jsou k dispozici od roku 2012 (firma *Z/I Imaging*, Německo, člen skupiny *Hexagon*).

²⁵ Při použití digitálních profesionálních komor středního formátu s tzv. digitální stěnou je možné dosáhnout extrémně velkého rozlišení obrazu (např. až 80 Mpix). Ani v těchto případech ale nebude splněna podmínka vysoké přesnosti stanovená pro měřické komory.

V *letecké fotogrametrii* dosahují největšího formátu snímku digitální měřické komory konstruované na principu *vícenásobné komory*. Takto je dosaženo rozměru digitálního snímku až 20.010 x 13.080 pixelů (260 Mpix). Komory využívající pro snímkování jediný snímač mohou mít v současné době rozměr snímku až 16.768 x 14.016 pixelů (235 Mpix). Na odlišném principu jsou konstruované komory pro snímání souvislého obrazového pásu *řádkou prvků CCD* (délky až 20.000 pix). Ve všech případech se jedná pouze o snímky panchromatické (černobílé).

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 (skenováných) 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 (např. na 8 nebo 24 bitů).

Přestože rozlišení těchto skenerů je dostatečné, jsou *nevhodné pro použití ve fotogrametrii*. 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 23 x 23 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 μm , umožněna je volba nižšího rozlišení v násobcích velikosti CCD (např. pro CCD velikosti 7 μm je možné volit také rozlišení 14, 21, 28, 56, 112 a 224 μm),
 - *geometrická přesnost*: požadovaná přesnost pro uspořádání čidel a pohyb předlohy nad snímačem je 1-2 μm ,
 - *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. 260 x 260, 250 x 275, 330 x 440 mm), vždy je umožněno skenovat alespoň standardní formát leteckého měřického snímku 230 x 230 mm, buď jednotlivé snímky, nebo i z nerozřezané role filmu,²⁶
 - *osvit*: stabilním světelným zdrojem, který nemění svoje charakteristiky (např. halogenová nebo xenonová výbojka),²⁷
 - *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, Δx požadovaná přesnost v mm , k volitelná konstanta zabezpečující požadovanou přesnost (volíme v rozmezí 2-3), **25,4** je délka palce v mm .²⁸

²⁶ Většina zařízení nabízí automatický posun filmu ve skeneru a ukládání nasnímaných obrazů do samostatných souborů. Celá role filmu tak může být skenována plně automaticky.

²⁷ Po stanoveném počtu hodin provozu je třeba světelný zdroj vyměnit, aby byly zachovány stále stejné podmínky osvětlení.

²⁸ 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 RGBG²⁹ – toto uspořádání se nazývá Bayerova mřížka nebo filtr;³⁰ každá čtveřice čidel dává výstupní barevný signál pro jeden pixel; výsledný počet pixelů je v každé řádce a v každém sloupci o jeden menší než je počet čidel v řádku resp. ve sloupci; 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 pohltivost světla vrstvou křemíku o určité tloušťce nebo organických barviv (stejný s principem barevného filmu v klasické analogové fotografii)

²⁹ 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.

³⁰ 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 v předmětovém prostoru; F' – ohnisko v obrazovém prostoru;
 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: $M_s = 1 : m_s = \frac{r'}{r} = \frac{b}{a}$, pro *měřítkové číslo*: $m_s = \frac{r}{r'} = \frac{a}{b}$.

➤ Vady objektivu

Použitím skutečného objektivu dochází k porušení ideálního středového promítání. Tyto odchylky nazýváme vady zobrazení objektivu (*aberrace*). Podle vlivu na výsledný obraz vady objektivu dělíme do tří skupin s vlivem na *kvalitu celého snímku, ostrost zobrazení bodu a zkreslení zobrazení předmětu*.

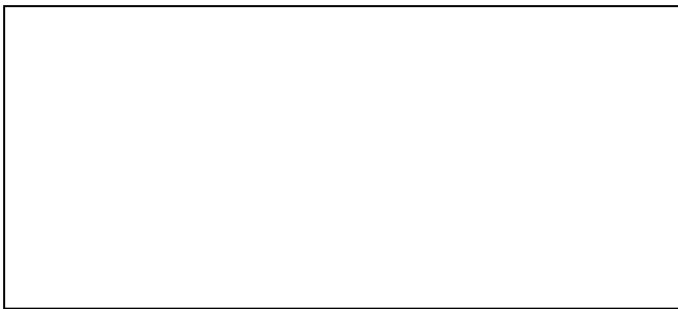
1. Kvalita snímku

- **úbytek jasnosti** – *vignetace (vinětace)* je způsobena pohlcováním světla při průchodu sklem čoček objektivu a odrazy na jejich ploše. Zvětšuje se směrem k okrajům snímku. Projevuje se zvláště u širokouhlých objektivů;

Nežádoucím odrazům světla od přední plochy první čočky i vnitřním odrazům uvnitř objektivu zamezuje **antireflexní (protiodrazová) vrstva**,¹ a tím významně zlepšuje světelnost objektivu.

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.

K dalšímu úbytku celkové jasnosti snímku dochází vlivem konstrukce objektivu, při které se průměry čoček směrem do komory zmenšují nebo jsou vsazovány do objímek (tzn. při sestavování objektivu se vychází z nejmenšího průměru čočky). Docílí se tak zmírnění vlivu některých jiných vad.



2. Ostrost zobrazení bodu

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 rozptýlné kroužky;

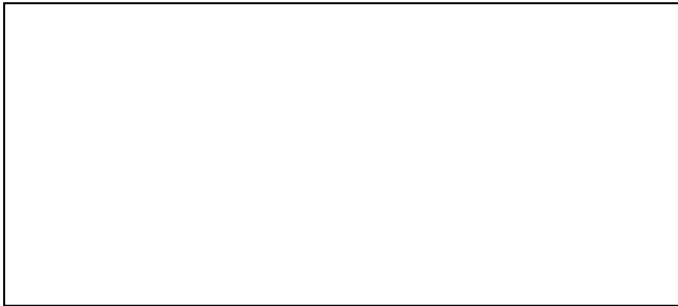


Lze zmírnit soustavou čoček **aplanát** (kombinace spojky a rozptylky).

¹ 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 svazek rovnoběžných paprsků se se za čočkou neprotne v jednom bodě, ale vytvoří mnoho průsečíků; vznikne obraz připomínající tvar komety nebo vějíře;²

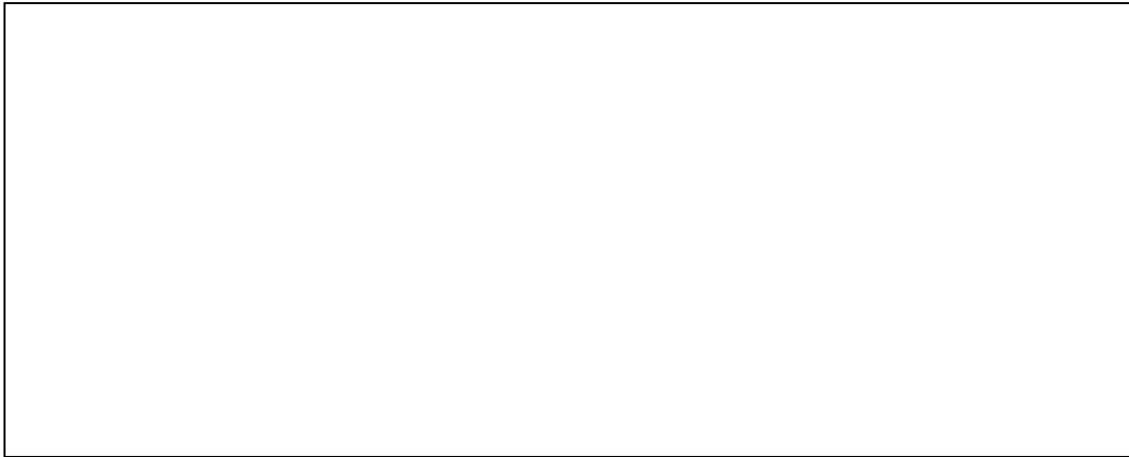


Odstraní se společně s astigmatismem při výrobě (zasazením čoček do objímek).

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;

² V latinském jazyce znamená slovo *coma* vlasy a *cometes* vlasatice, resp. kometa.



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 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

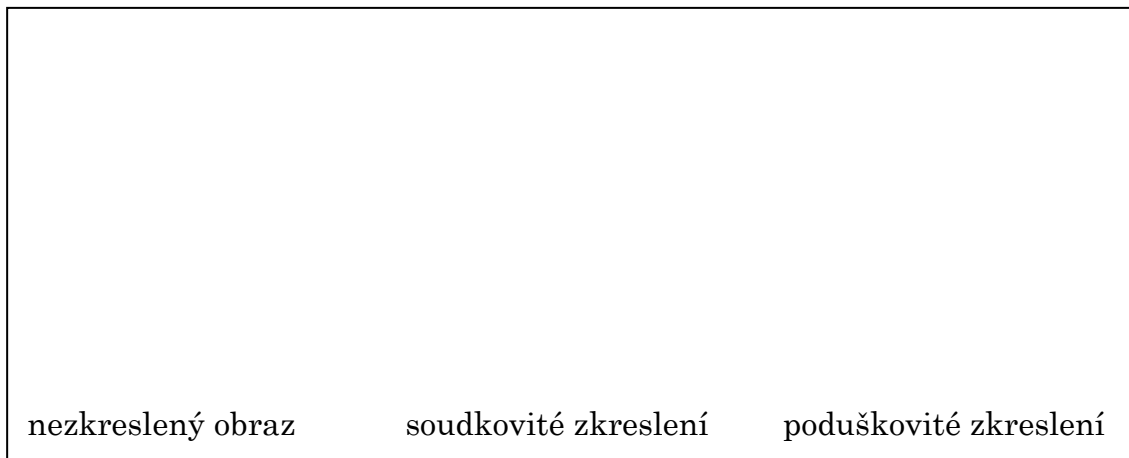


3. Zkreslení zobrazení předmětu

Má přímý vliv na geometrii zobrazení a výrazně ovlivňuje přesnost měření na snímku (mění polohu bodů v obraze).

a) **geometrické zkreslení**

- síť pravoúhlých přímk 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.³

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.⁴



³ *Radiální* znamená ve směru průvodiče (poloměr – radius).

⁴ *Tangenciální* znamená ve směru tečny (tangenty).

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

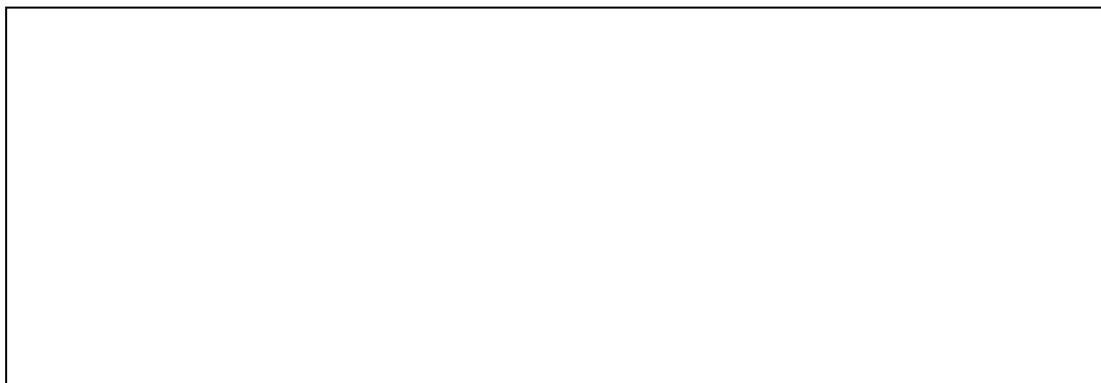
- **měřické** (speciální zařízení určená pro pořizování měřických snímků):
 $\Delta r' \leq 10 \mu m$
- **semiměřické** (kvalitní fotoaparáty uzpůsobené pro měřické účely):
 $\Delta r'$ až $200 \mu m$ (na okrajích snímku), předpokládáme symetrický vliv
- **neměřické** (běžné kvalitní fotoaparáty):
 $\Delta r'$ 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.⁵ Opravy z vlivu distorze jsou při počítačovém zpracování přiřazeny k měřeným souřadnicím na snímku v závislosti na jejich velikosti nebo na radiální vzdálenosti bodu.

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

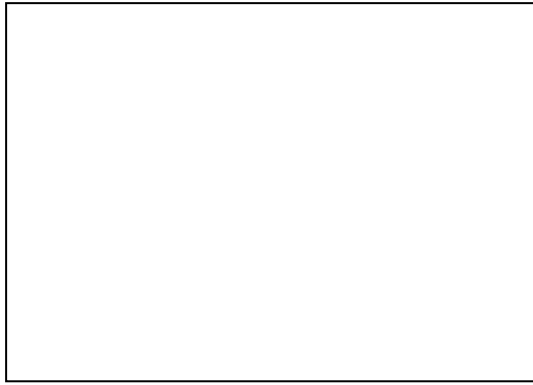
b) **charakteristickou křivkou** – znázorňuje velikost a průběh distorze v závislosti na vzdálenosti od středu snímku, tj. radiální vzdálenosti r' . Zobrazuje průběh polynomu zkreslení v jednom směru nebo pro každý oktant.



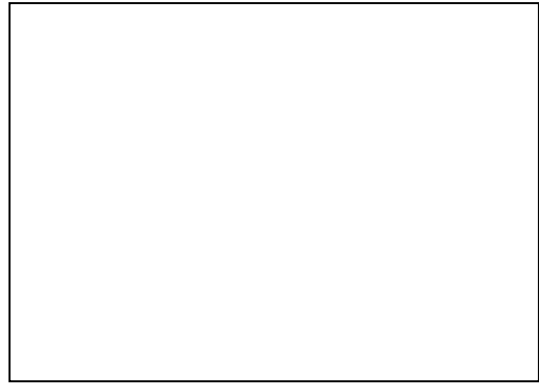
c) **průměrnou hodnotou** – zanedbávají se změny velikosti zkreslení v závislosti na vzdálenosti od středu snímku a uvažuje se jedna průměrná hodnota zkreslení pro všechny body ve všech směrech.

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.

⁵ 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, a tím upravováno měřítko zobrazení snímku.

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.



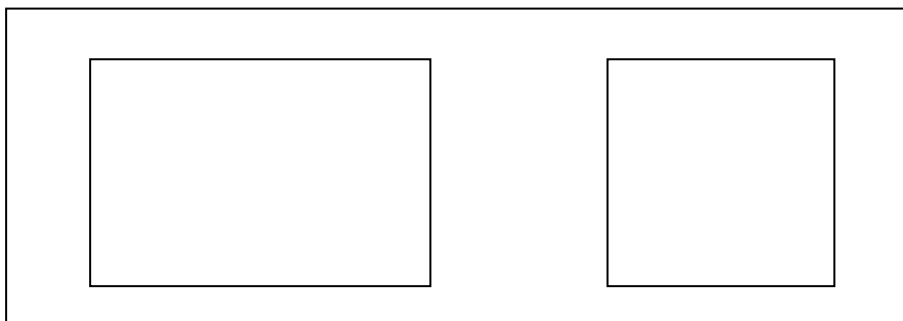
Zobrazení objektivem měřické komory při zaostření na nekonečno¹

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).² Určuje se pro měřické komory s přesností na $0,01 \text{ mm}$. Zobrazuje se v rámových údajích na snímku.

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



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

² Není totožná s ohniskovou vzdáleností.

³ 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.⁴ Pro práce menší přesnosti je možné rozdíl v poloze hlavního bodu a středu snímku zanedbat.

c) **průběh radiální distorze $\Delta r'$** se udává členy polynomické funkce (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).

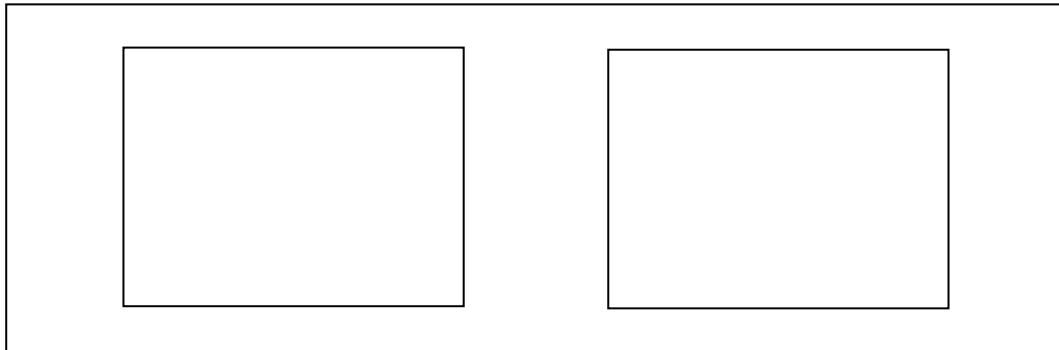
Prvky vnitřní orientace musejí být určeny pro každou měřickou komoru a výrobce je uvádí v kalibračním protokolu.

➤ souřadnicové soustavy

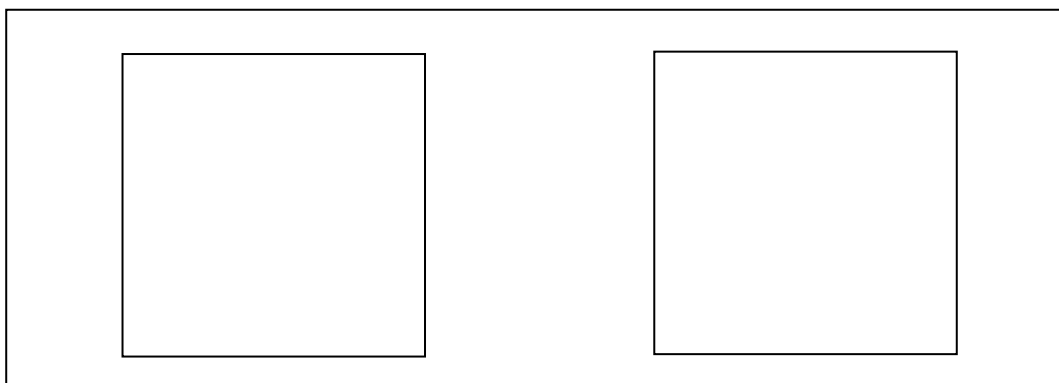
Souřadnicové soustavy ve fotogrammetrii (rovinné i prostorové) mají orientaci a označení os shodné s kartézským systémem souřadnic.

a) **snímkové souřadnice x' , z' , resp. x'' , y''** (rovinné) – 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. Měřené souřadnice je také třeba pro práce vyšší přesnosti před dalším použitím opravit o vliv radiální distorze (viz str. 37).

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



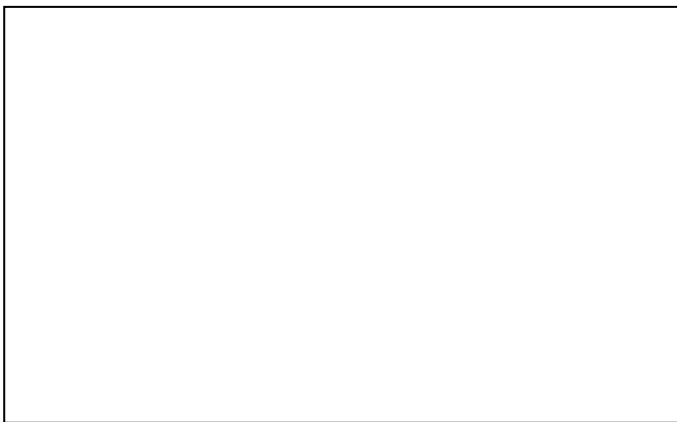
– letecká fotogrammetrie: (x', y') – levý snímek, (x'', y'') – pravý snímek



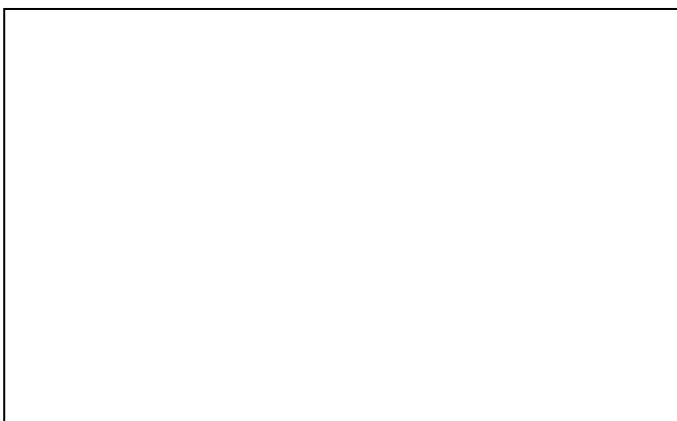
⁴ Velikost rozdílu v poloze hlavního bodu a středu snímku závisí na přesnosti sestavení objektivu a těla komory při výrobě.

b) **modelové souřadnice x, y, z** (prostorové) – 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). Pokud je směr spojnice rámových značek shodný se směrem základny, resp. směrem letu, pak osa x směřuje do středu vstupní pupily na stanovisku pravém v pozemní fotogrammetrii (je přibližně rovnoběžná s fotogrammetrickou základnou), resp. do středu vstupní pupily následujícího snímku v řadě v letecké fotogrammetrii. V analytických metodách mohou být osy obecně orientované v prostoru. Modelové souřadnice Vyjadřují správný tvar, ale velikost předmětů je upravena měřítkem modelu (poloha bude určena až v systému geodetických souřadnic).

- 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** (prostorové) – vyjadřují skutečný tvar, velikost a polohu předmětů; pro mapovací práce ve velkém měřítku se uvádějí v *m* s přesností na 0,01 m.⁵

⁵ 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 $[X_0, Y_0, Z_0]$ a orientaci měřické komory v prostoru. Rozdělujeme je do dvou skupin:

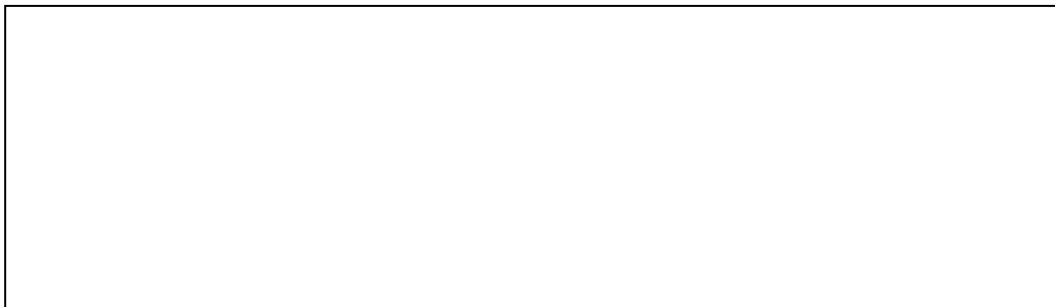
- a) **lineární prvky** $[X_0, Y_0, Z_0]$ – geodetické souřadnice středu vstupní pupily,
- b) **úhlové prvky** $(\kappa, \varphi, \omega)$ – pootočení snímku, orientace a sklon osy záběru (kladný směr otáčení je protisměru chodu hodinových ručiček).

– **pozemní fotogrammetrie**

κ – **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)



φ – **orientační úhel** (vodorovný úhel, otáčí se kolem osy z); pro $\varphi = 0$ nastává **normální případ** (osy záběru jsou kolmé k základně, resp. ke spojnicí vstupních pupil sousedních stanovisek základny)

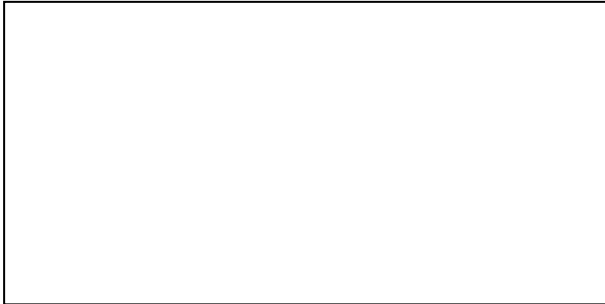


A – levé stanovisko základny; **B** – pravé stanovisko základny;
z – základna (také označovaná **b** – base)

Z praktických důvodů se při měření (resp. nastavení) úhlu φ počátek 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 φ' je v terénu měřená hodnota. Pro kladné úhly φ nastává **vlevostočený případ**, pro záporné úhly φ **vpravostočený případ**; ovšem ve zápisnících pozemní fotogrammetrie se označují opačným znaménkem podle kladného směru otáčení obvyklého v geodetických měřeních – vpravostočený $(+\varphi)$ a vlevostočený $(-\varphi)$.

Písmeny A, B a L, R se označují snímky z levého resp. pravého stanoviška 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. Toto značení se zobrazí také v rámových údajích na snímku.

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



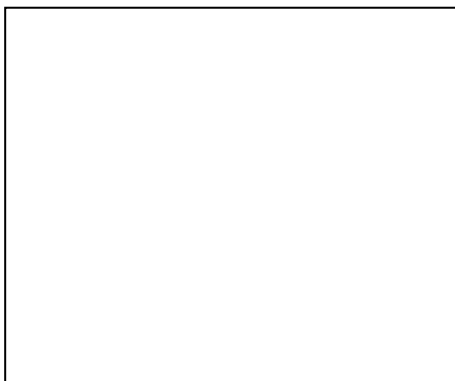
V pozemní dvousnímkové fotogrammetrii nastavujeme úhly κ a ω vzájemně kolmými křížovými libelami umístěnými na měřické komoře a úhel φ pomocí vodorovného kruhu s odečítací pomůckou a dalekohledu (tj. orientační soustavou měřické komory).

– *letecká fotogrammetrie*

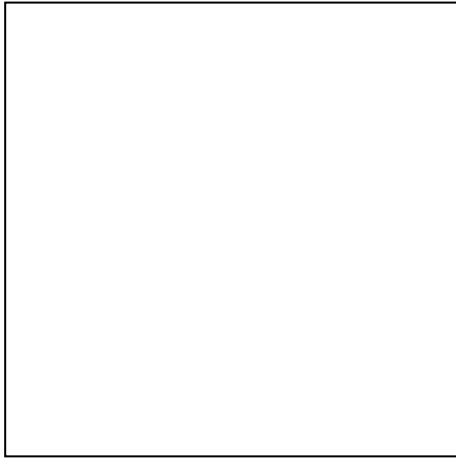
κ – **pootočení snímku** ve vlastní rovině (vodorovný úhel, otáčí se kolem osy z);
pokud se úhel $\kappa = 0$ spojnice rámových značek směřuje ve směru letu



φ – **podélný sklon** osy záběru měříme ve směru letu svislý úhel,
(otáčí se kolem osy y); pro tzv. svislé měřické snímky má být $\varphi \leq 3^\circ$



ω – **příčný sklon** osy záběru měříme kolmo na směr letu (svislý úhel, otáčí se kolem osy x); pro tzv. svislé měřické snímky má být $\omega \leq 3^\circ$



Jestliže jsou oba sklony (podélný i příčný) menší než 3° a osy záběru jsou přibližně svislé, bude jejich vzájemná poloha téměř rovnoběžná a blíží se normálnímu pádu dvousnímkové pozemní fotogrammetrie.⁶

V letecké fotogrammetrii nastavujeme úhlové prvky vnější orientace pomocnými zařízeními měřické komory: sklony φ a ω pomocí *gyrostabilizace* (udržuje osu záběru ve svislici) a úhel κ *regulátorem překrytu* (umožňuje pořizovat vzhledem ke směru letu nestočené snímky s dostatečným překrytem).

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

➤ Tvar, poloha a orientace paprskového svazku

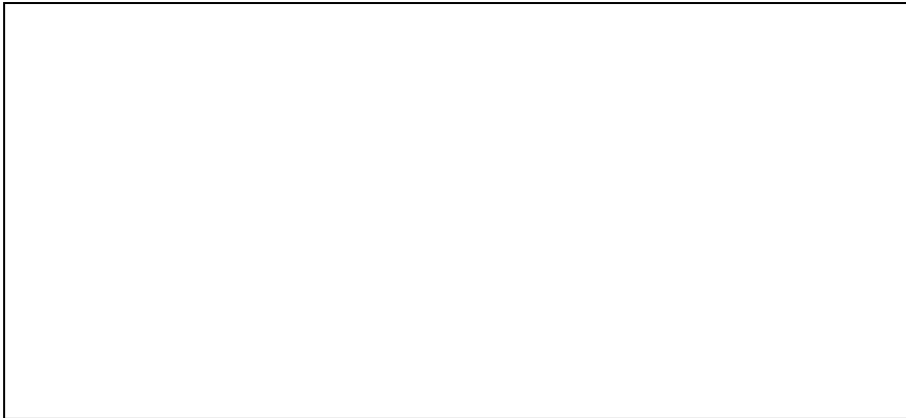
Pro definici prvků vnitřní a vnější orientace se často používá pojem *paprskový svazek* nebo *trs*, který představuje všechny promítací paprsky známých i určovaných bodů. Přitom *promítací paprsek* je spojnice mezi bodem ve skutečnosti a jeho obrazem na snímku (v předmětovém a obrazovém prostoru).

Prvky vnitřní orientace definují *tvar paprskového svazku*.

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

⁶ Dále se podle velikosti úhlů φ a ω rozlišují snímky *strmé* ($3\text{-}10^\circ$), *šikmé* ($10\text{-}80^\circ$), *ploché* ($80\text{-}90^\circ$) a *vodorovné* – horizontální (90°).

- pro pozemní fotogrammetrii



- pro leteckou fotogrammetrii



Současné aplikace pozemní fotogrammetrie s vyhodnocením digitálních snímků na počítačích často používají značení a orientaci os totožné s leteckou fotogrammetrií (prostorovou souřadnicí je osa -z).

➤ **Rámové značky**

- jsou zabudovány v zadní stěně měřické komory – ve značkovém rámu,
- všechny musí ležet v jedné rovině kolmé k ose záběru a totožné s rovinou snímku (na rámové značky dosedá skleněná deska nebo plochý, listový film s citlivou vrstvou),
- známe jejich přesnou polohu ve snímkových souřadnicích (spolu s prvky vnitřní orientace jsou uváděny výrobcem komory kalibračním protokolem),
- při expozici se jejich obraz přenesou na negativ,
- v pozemní fotogrammetrii jsou nejčastěji 4 ve středech stran snímku,⁷
- v letecké fotogrammetrii je nejčastěji celkem 8 značek ve středech stran a v rozích,
- rámové značky mohou být mechanické (kovové výstupky nebo hroty) nebo optické, uměle osvětlované (např. soustředné kružnice nebo křížky).

⁷ U semiměřických *réseau* komor jsou rámové značky nahrazeny sítí křížků vyrytou v planoparalelní skleněné destičce a následně zobrazenou v celé ploše snímku.

2.4. Transformace souřadnic ve fotogrammetrii – matematické základy

Transformace mezi systémy snímkových, modelových a geodetických souřadnic jsou v současné době základem všech metod vyhodnocení jednosnímkové, dvousnímkové a průsekové fotogrammetrie, včetně analytických aerotriangulací a tvorby digitálního ortofota. Jsou součástí analytických a digitálních metod, které řeší vyhodnocení i obecně orientovaných snímků. Nahrazují dnes již nepoužívané principy optických a mechanických konstrukcí analogových strojů.

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.²

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 $(n+1) \cdot (n+2)$. Mezi identickými body dochází k poměrně spolehlivé interpolaci souřadnic (tj. polohy) transformovaných bodů – transformace vytváří lokální deformace. Nejvíce se používají transformační rovnice s polynomy 2. a 3. stupně (min. 6 a 10 identických bodů).³

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

² 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.

³ Pokud je polynom prvního stupně ($n=1$) přechází polynomická transformace na afinní (min. 6 identických 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 (není třeba znát příslušné kartografického zobrazení).

- transformace s polynomy 1. stupně (afinní)

$$X = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y, \quad Y = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot y$$

- transformace s polynomy 2. stupně (12 koeficientů transformačního klíče)

$$X = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y + a_3 \cdot xy + a_4 \cdot x^2 + a_5 \cdot y^2, \\ Y = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot y + b_3 \cdot xy + b_4 \cdot x^2 + b_5 \cdot y^2$$

- transformace s polynomy 3. stupně (20 koeficientů transformačního klíče)

$$X = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y + a_3 \cdot xy + a_4 \cdot x^2 + a_5 \cdot y^2 + a_6 \cdot x^2y + a_7 \cdot xy^2 + a_8 \cdot x^3 + a_9 \cdot y^3 \\ Y = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot y + b_3 \cdot xy + b_4 \cdot x^2 + b_5 \cdot y^2 + b_6 \cdot x^2y + b_7 \cdot xy^2 + b_8 \cdot x^3 + b_9 \cdot y^3$$

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).⁴ Transformace mění polohu pixelu v rastrovém digitálním obrazu. Musí být splněn požadavek na rovinatost terénu nebo objektu (bez větších převýšení nebo 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 dvousnímkové a průsekové fotogrammetrii 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 projekční transformace*.⁵

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.

⁴ Dříve se překreslení provádělo opticko-mechanicky na *překreslovačích*, které musely zajistit zcela stejné vztahy mezi rovinou snímku a rovinou mapy, a to také pomocí 4 identických bodů.

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

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.

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.⁷ 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 κ, φ, ω (otočení komory a sklony osy záběru).

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

⁷ 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.

➤ Příklad použití transformací v prostoru

Pokud jsou snímky obecně orientované, má systém modelových souřadnic po použití *lineární perspektivy* směr os také v obecném směru – jsou pootočené o hodnoty úhlů κ , φ , ω od výchozích (nulových) směrů. Provede se pouze převod středového promítání snímku na pravoúhlé promítání prostorového systému modelových souřadnic.

Po použití *prostorové podobnostní transformace* leží osy geodetického systému ve směru nulových hodnot úhlů κ , φ , ω . Provede se převod mezi pravoúhlým prostorovým systémem modelových a geodetických souřadnic. Promítací rovina je potom v *pozemní fotogrammetrii* svislá ($\omega = 0$), rovnoběžná se základnou ($\varphi = 0$) a osa Z leží ve svislém směru ($\kappa = 0$) – získáváme pravoúhlý průmět do roviny, ve které leží osy X , Z ve vodorovném resp. svislém směru a promítací paprsky mají vodorovný směr. V *letecké fotogrammetrii* bude po transformaci promítací rovina vodorovná ($\varphi = 0$ a $\omega = 0$) a osa X leží přesně ve směru letu ($\kappa = 0$) – získáváme pravoúhlý průmět do roviny, ve které leží osy X , Y ve vodorovném směru a promítací paprsky mají svislý směr.⁸

Projektivní (kolineární) prostorová transformace je základem všech moderních aplikací dvousnímkové fotogrammetrie (analytických a digitálních metod vyhodnocení). Používá se také pro snímkové triangulace a pro tvorbu digitálního ortofota.

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 potřebujeme znát tři souřadnice alespoň 3 identických bodů v překrytovém území snímkové dvojice.⁹ 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:

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

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

⁸ Uvedený postup popisuje pouze jednu z možností využití převodu mezi systémy souřadnic.

⁹ 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 κ, φ, ω (otočení komory a sklony osy záběru) pravého snímku,

r_{ij}^L ... prvky matice rotace obsahující kombinace sinů a kosinů rotačních úhlů κ, φ, ω (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 dvousnímkové fotogrammetrie nebo obecně orientovaných snímků průsekové fotogrammetrie. *Využití:* přímý převod mezi snímkovými a 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 snímkovými a geodetickými souřadnicemi (při analytickém a digitálním 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 pouze kontrolní charakter. V letecké fotogrammetrii jsou pro zpřesnění přibližných hodnot prvků vnější orientace nutné.

➤ 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,¹
- mohou mít přirozenou nebo umělou signalizaci,
- velikost signálu závisí na měřítkovém čísle snímku m_s a velikosti měřické značky

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

kde d je průměr měřické značky ve vyhodnocovacím přístroji,²
 h výška letu, y vzdálenost předmětů před objektivem a f konstanta komory.

➤ Volba vlíčovacích bodů

- *jednosnímková fotogrammetrie*

Pro překreslení snímku nebo kolineární rovinnou transformaci 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.



¹ Např. grafická přesnost výsledného plánu: 0,2 mm, pro vlíčovací body dvakrát vyšší: 0,1 mm, v měřítku 1:100 to znamená přesnost požadovanou pro určení vlíčovacího bodu: 0,01 m nebo pro mapu v měřítku 1:10 000 to znamená přesnost požadovanou pro určení vlíčovacího bodu: 1 m.

² Velikost měřické značky se liší podle konkrétního výrobce a výrobku; obvykle se pohybuje v rozmezí 0,04 až 0,05 mm.

– *dvousnímková a průseková fotogrammetrie*

Pro vnější orientaci prostorového modelu nebo prostorovou podobnostní (resp. projektivní) transformaci potřebujeme alespoň 3 vlícovací body o třech souřadnicích $[X, Y, Z]$; pro dvousnímkovou metodu musejí ležet v překrytové části snímků.



Uvedené počty vlícovacích 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.³

➤ **Signalizace vlícovacích 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*

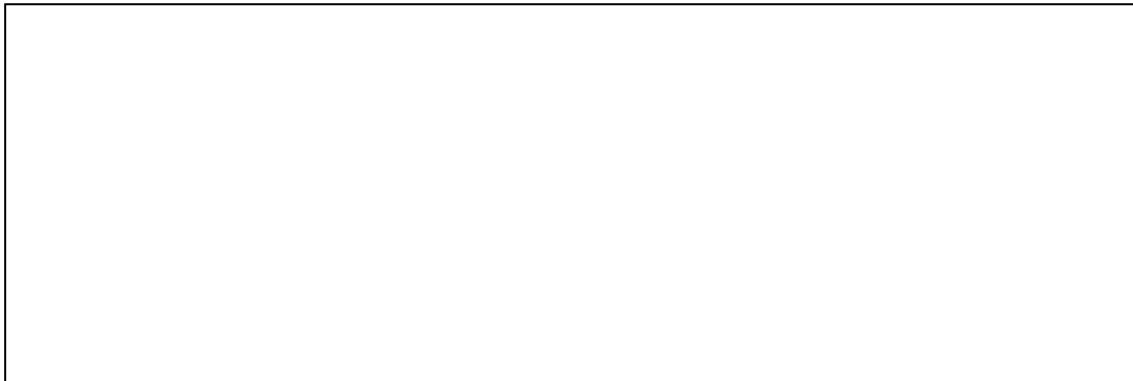
přirozená signalizace – pro malá a střední měřítko mapy: rohy pozemků, paty stožárů a osamělých stromů, křoviska, křižovatky, křížení cest a vodních toků

Výběr a vyznačení vlícovacích bodů se provádí na snímcích až po provedení snímkovém letu.

³ 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 snadno 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)⁴

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)

⁴ Vlivem přezáření bílé barvy na snímku se bude signál zobrazovat větší než průměr měřické značky.

2.6. Stereoskopické vidění a měření

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 nebo zakrýváním vzdálenějších předmětů předměty bližšími, ubýváním kontrastu barev se vzdáleností a 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.¹



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

γ – **konvergenční úhel**,

d_γ – **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:

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

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

¹ 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.

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

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

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

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_γ , 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 monokulárním pozorování (pouze jedním okem) $d_\gamma = 60''$.

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

y [m]	0,25	1	10	100	450	1000
d_y	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

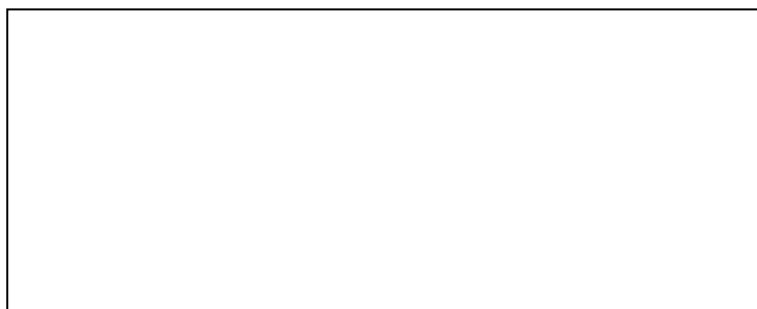
– provádí se pomocí zrcadel nebo hranolů a používá se u binokulárních dalekohledů (triedry) v turistice, lovectví nebo vojenství; extrémního rozšíření oční základny se využívá při pozorování objektů na moři v námořní plavbě (zlepšuje se odhad vzdálenosti a schopnost určit, zda se předměty vzdalují nebo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

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

b) zvětšení ostrosti vidění

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

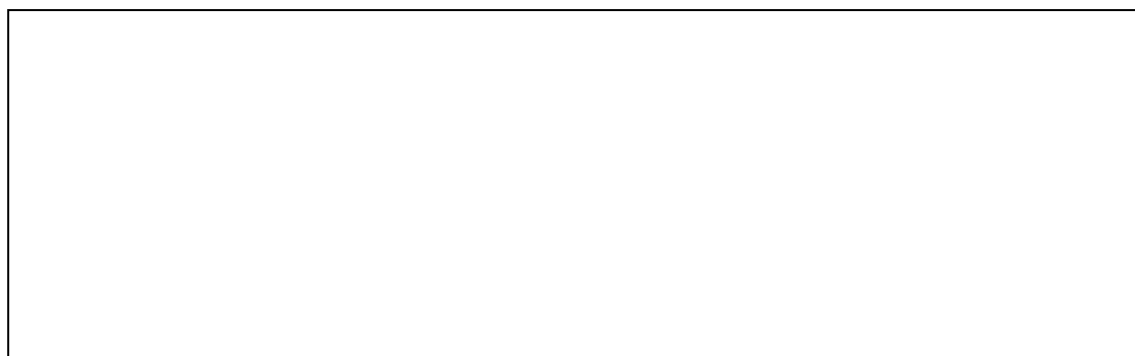
Totální plastika je součin specifické plastiky a optického zvětšení $n \cdot v$; udává, kolikrát se celkově zlepši přesnost stereoskopického pozorování při použití rozšíření oční základny i zlepšení ostroty vidění.



➤ umělé stereoskopické vidění

Pro získání *umělého stereoskopického vjemu*:

- a) Potřebujeme dva snímky pořízené za těchto podmínek:
- osy záběru musí být rovnoběžné
 - na snímcích je zjistitelná **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.²
 c) Snímky musí být správně orientovány – během tzv. relativní orientace obnovujeme vzájemné postavení snímků, jaké bylo při jejich pořízení.³

² Všechny dále uváděné technologie pro získání umělého stereoskopického vidění řeší různým způsobem právě tuto podmínku.

³ Snímky pokládáme překrytovou částí k sobě. Správnou orientaci je možné kontrolovat 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° a záměnou levého a pravého snímku – prostorová souřadnice potom nabývá opačných hodnot. Využívá se v letecké fotogrammetrii pro kontrolu vyhodnocení výškopisu v rovinatém terénu, kde je jistota prostorového umístění měřické značky na terén menší,
- **nulový vjem** vznikne otočením snímků o 90° – z vertikální paralaxy se stává horizontální a může být měřena. Nenulové hodnoty ve směru vertikálních paralax ale způsobí, že nevidíme plasticky. Používá se při měření malých rozdílů ve vertikálním směru pro vědecké účely.

➤ prostředky pro získání 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 nejdlejší body nesmí být vzdáleny více než 65 mm a maximální horizontální paralaxa je 40 až 50 mm .

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

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.
--	--

Tyto obtíže odstraňují následující pomůcky:

– stereoskopy:

čočkový: před oči umístíme silné lupy (spojné čočky), 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 zároveň umožňuje pozorovat snímky větších formátů);

hranolový: oční základna se rozšiřuje pomocí optických hranolů; jsou součástí větších vyhodnocovacích přístrojů.

Čočko-zrcadlové stereoskopy se používají jako samostatná zařízení pro jednoduché metody vyhodnocení letecké fotogrammetrie (např. *Stereometr Zeiss*). Při pozorování snímků stereoskopem slouží k měření *stereomikrometr* (z měřených hodnot s odhadem na $0,01\text{ mm}$ lze vypočítat rozdíly horizontálních paralax a výškové poměry v území).

Zrcadlové stereoskopy se využívají i u malých 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 získání umělého stereoskopického vjemu se liší způsoby oddělení obrazu pro levé a pravé oko:⁴

- **Anaglyfy** – snímky zobrazíme v doplňkových barvách (např. červené a azurové) a pozorujeme je brýlemi se stejně zbarvenými skly (barevnými filtry). Tímto způsobem je umožněno oddělené vnímání dvou vytištěných (v soutisku s mírným posunem), na monitoru počítače zobrazených nebo promítaných obrazů.⁵

Brýle jsou jednoduché a levné, ale stereovjem není příliš kvalitní (oddělení obou obrazů není dokonalé a nelze docílit dobrého barevného podání). Výhodou je možnost pozorování více osobami.



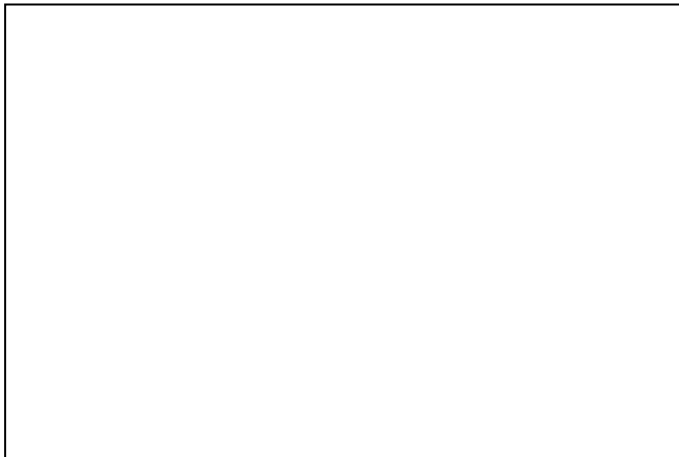
- **Krystalové brýle** – na monitoru je střídavě zobrazován levý a pravý snímek. Ve shodě s tím (pomocí infračerveného přenosu) je v brýlích se skly s tekutými krystaly střídavě cloněno levé a pravé oko a tím je umožněno oddělené pozorování obou snímků. Je-li frekvence střídání dostatečně vysoká

⁴ Levé oko vidí pouze levý snímek a pravé oko pouze pravý snímek.

⁵ Pro oba snímky v jednom obraze (barevně vytištěné nebo zobrazené na monitoru) se využívá princip *subtraktivního míchání barev* (barvy se odečítají od bílého podkladu) – např. levé sklo brýlí: červená, pravé sklo brýlí: azurová, levý obraz: azurový, pravý obraz: červený – komplementární barva se při ohledu brýlemi jeví jako černá. Pro dva snímky samostatně promítané pomocí světelných zdrojů přes barevné filtry (projekce na plátno) se využívá princip *aditivního míchání barev* (barvy se přičítají k neosvětlenému podkladu) – např. levé sklo brýlí: červená, pravé sklo brýlí: azurová, levý obraz: červený, pravý obraz: azurový – tmavou kresbu jednoho snímku osvětluje komplementární barva druhého snímku, takže se při pohledu brýlemi jeví jako černá.

(minimálně 25 Hz podobně 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 .⁶

Brýle jsou *aktivní* – drahé, větší a potřebují zdroj elektrické energie.⁷



- **Polarizační brýle a polarizační filtr** – na monitoru se opět s vysokou frekvencí střídavě zobrazují levý a pravý snímek. Ve shodě s tím se mění i polarizace filtru (modulátoru) 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 pro oddělení obou obrazů vzniká stereoskopický vjem.⁸

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



⁶ Nutná je vysoká obnovovací frekvence monitoru. Proto byly zpočátku používány pouze CRT (*Cathode Ray Tube*) monitory. V současné době tento požadavek splňují také některé LCD (*Liquid Crystal Display*) monitory (určené pro 3D zobrazování).

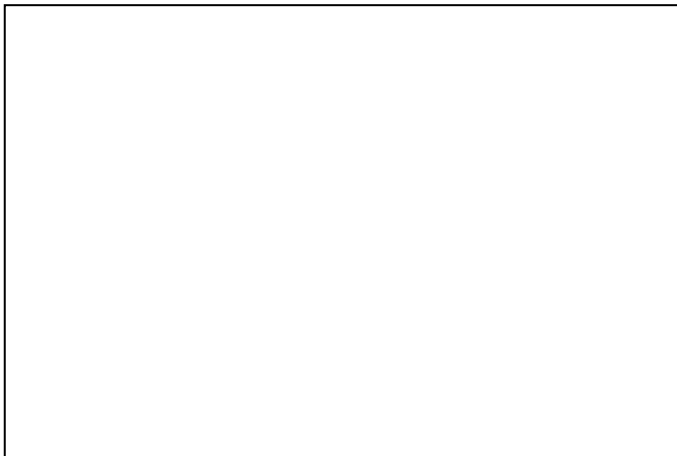
⁷ Na podobném principu pracoval starší typ brýlí s mechanickými rotačními clonami, které ale byly dosti těžké a jejich použití problematické.

⁸ Podobného principu se využívá při současném (bez modulátoru) nebo odděleném (s modulátorem) promítání obou obrazů přes polarizační filtry v kinematografii – tzv. 3D kina (pozn. povrch plátna nesmí měnit polarizaci odraženého světla).

Obdobná je technologie, kdy filtr před monitorem nemění svojí polarizaci, ale všechny liché, resp. sudé sloupce obrazu jsou filtrem trvale polarizovány v horizontálním, resp. vertikálním směru. Není třeba vysoká frekvence obnovování obrazu (současně se promítají oba obrazy rozdělené do lichých, resp. sudých sloupců). Rozlišení obrazu v jednom rozměru se ovšem snižuje na polovinu.

- **Polarizační brýle a polopropustné polarizační zrcadlo** – dva ploché monitory jsou umístěny nad sebou v úhlu cca 110° . 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 pasivní *brýle s polarizačními filtry* jako v předchozím případě (na pravém oku s horizontální polarizací, na levém oku s vertikální polarizací). Stereoskopický vjem je kvalitní, přitom odpadá potřeba vysoké obnovovací frekvence použitých monitorů (tj. střídání dvou obrazů na jednom monitoru). Pořizovací náklady jsou ovšem vysoké.



- **Autostereoskopické prostředky** – tzv. *lentikulární obrazy* umožňují vznik stereoskopického vjemu bez potřeby jakýchkoli brýlí. Využívají fólie s lineárními čočkami, která se umísťuje na vytištěný obraz, monitor nebo display (např. u mobilních telefonů). Současně se zobrazují levý i pravý snímek, které jsou rozřezány na tenké proužky (sloupce) a opět složeny do jednoho obrazu tak, že se střídají proužky z levého a pravého snímku. Lineární čočky odklánějí všechny proužky z levého snímku do levého oka a všechny proužky z pravého snímku do pravého oka, a tím je opět docíleno odděleného pozorování obou snímků. Nevýhodou je snížení rozlišení obrazu na polovinu nebo i méně, pokud se má docílit širšího pozorovacího úhlu.

Existují i další technologie pro prostorové zobrazování bez brýlí (např. *holografie*), které se ale ve fotogrammetrii nepoužívají.

Současné digitální fotogrammetrické systémy pro stereoskopické vyhodnocení umožňují po provedení orientace snímků průběžně odstraňovat vertikální paralaxy pomocí **epipolární transformace** a tím neustále udržovat stereoskopický vjem. Pozemní i letecké snímky potom mohou být obecně orientované, ale musejí mít překrytovou část a alespoň přibližně rovnoběžné osy záběru. Během vyhodnocení jsou epipolární transformací převáděny na případ normální. Toto řešení je založeno na **podmínce komplanarity**, která bude splněna, pokud odpovídající si paprsky stereodvojice leží v jedné rovině se základnou, tzn. v této rovině leží také oba středy vstupních pupil, pozorovaný bod a jeho obrazy na snímcích.

