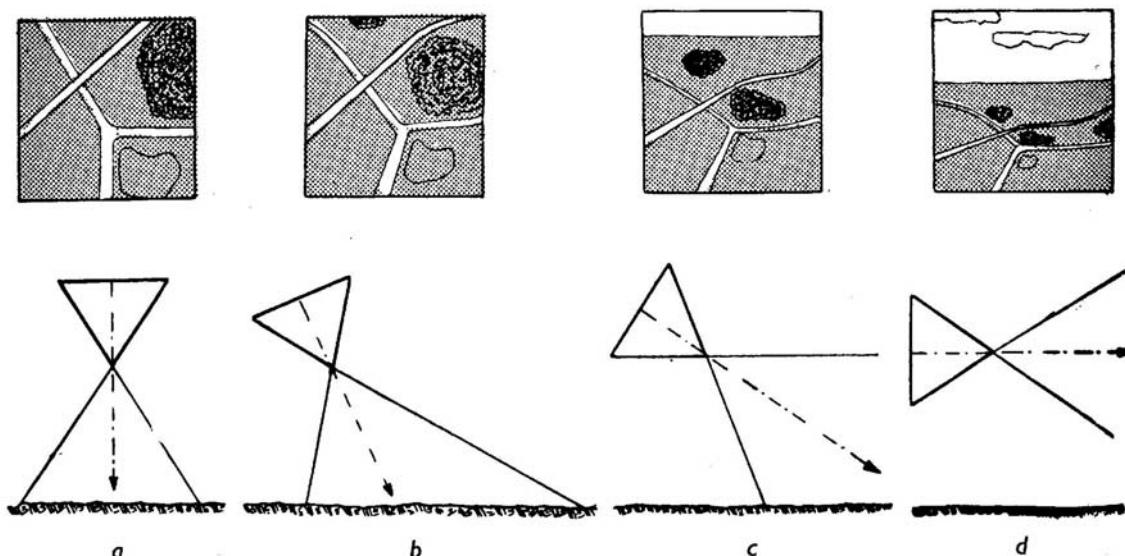


4. Souřadnicové soustavy ve fotogrammetrii, vlivy působící na geometrii letecké fotografie

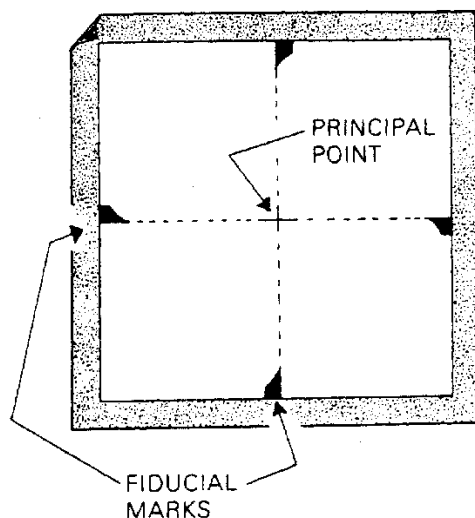
Podle orientace osy záběru dělíme snímky ve fotogrammetrii na snímky svislé (kolmé), šikmé, ploché a horizontální (obr. 4.1). V důsledku nestability nosiče vznikají odchylky osy záběru od tížnice. Při odchylce 1 až 3 stupně lze považovat snímek za kolmý. Šikmé se nevyžívají často (obsahují značné distorze měřítka) – z hlediska interpretace však některé objekty či jevy jsou na těchto fotografiích názornější (lépe rozpoznatelné) – používají se pro dokumentační účely.



Obr. 4.1 Rozdělení leteckých snímků podle orientace osy záběru

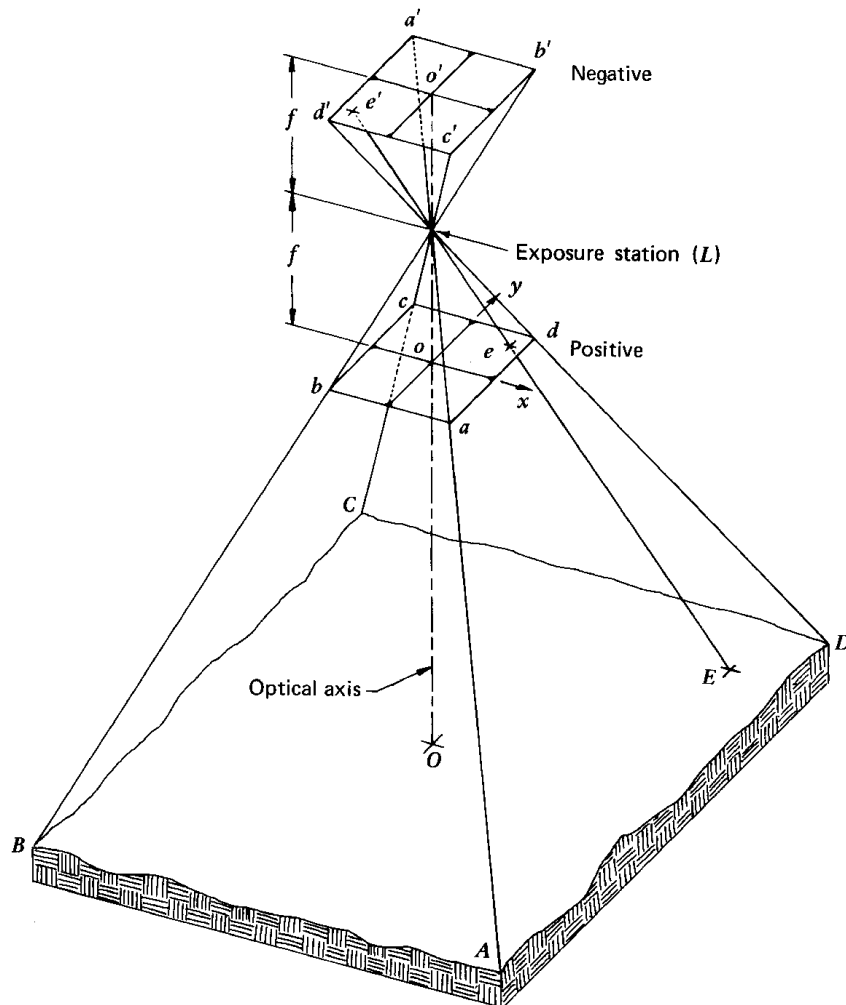
Geometrické prvky svislé letecké fotografie

Na LMS se vedle vlastního obrazu zobrazují také rámové (měřické) značky (obr. 4.2). Tyto slouží jednak k určení některých významných bodů na snímku a jednak k definování souřadnicové soustavy tzv. snímkových souřadnic. Značky bývají čtyři resp. osm a jsou umístěny ve středech jednotlivých stran a nebo v rozích fotografie. Spojnice protilehlých rámových značek definují střed fotografie (centrální bod). Tento bod je také počátkem snímkové souřadnicové soustavy.



Obr. 4.2 Rámové (měřické) značky a střed fotografie (centrální bod) na leteckém snímku

Souřadnicové soustavy, základní konvence značení



Obr. 4.3 Souřadné soustavy a konvence jejich značení

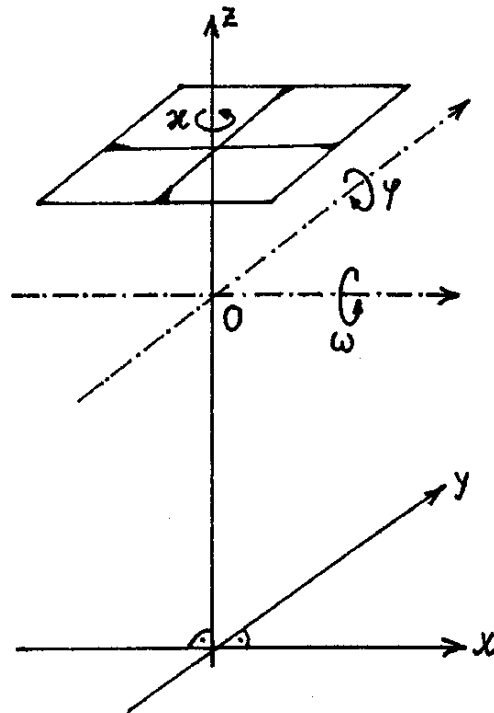
Ideálně kolmá fotografie by měla osu optického systému shodnou se svislicí vedenou středem optického systému (se směrem gravitace). V důsledku nestability nosiče a nedokonalosti optického systému vznikají odchylky. Odchyly do 3 stupňů je možno zanedbat. Světelné paprsky odražené objekty v terénu jsou centrální projekcí přes střed optického systému kamery (L) zobrazovány v rovině negativu. Ta je od L vzdálena o hodnotu konstanty kamery (f - ohnisková vzdálenost). Předpokládáme-li, že pozitiv bude mít stejnou velikost jako negativ snímku, ve vzdálenosti f před L lze definovat rovinu pozitivu.

Vztah mezi snímkem a předmětem – podobnost mezi rovinným územím a jeho centrálním průmětem existuje pouze, když útvar leží v rovině rovnoběžné s tzv. předmětnou rovinou. V tomto případě zůstávají zachované i měřítkové poměry. V letecké fotogrammetrii je to **ideální případ**, kdy osa je přesně svislá a zobrazené území je horizontální rovinou. Snímky se označují jako „nadirové“. Pro vyjádření vztahu mezi polohou předmětů na snímku a jejich skutečnou polohou např. v geodetických souřadnicích se ve fotogrammetrii používá následujících **souřadných soustav** (obr. 4.3):

- Soustava snímkových souřadnic x', y', z' (levý snímek), x'', y'', z'' (pravý snímek).
Počátek je v hlavním bodě O' , $z' = -f$
- Soustava modelových souřadnic: x, y, z
- Soustava geodetická: X, Y, Z

Podle doporučení Mezinárodní společnosti pro fotogrammetrii a DPZ (ISPRS) jsou soustavy definovány podle následujících pravidel:

- Osa x je položena přibližně ve směru letu
- Kladný směr rotací je volen ve směru chodu hodinových ručiček
- Primární je osa x, sekundární osa y, terciální z
- Počátek souřadnicových soustav je umístěn v průmětu levého stanoviška stereodvojice
- Orientaci os x, y, z v prostoru určují úhly rotace ω , φ , κ (obr. 4.4)



Obr. 4.4 Rotace souřadných systémů

Konvenční značení souřadnicových soustav: Jednotlivé body v terénu jsou značeny velkými písmeny (A, B, ..., O (L) - hlavní bod). Obrazy odpovídajících si bodů v rovině pozitivu jsou označovány malými písmeny (a, b, ..., o). Obrazy odpovídajících si bodů v rovině negativu jsou označovány malými písmeny s čárkou (a', b', ..., o'). Souřadná soustava každé fotografie, která je tvořena tzv. snímkovými souřadnicemi má počátek v hlavním bodě. Osa x je orientována v linii letu a nabývá kladných hodnot ve směru letu. Osa y je na ni kolmá a nabývá kladných hodnot ve směru určeném úhlem 90 stupňů proti směru pohybu hodinových ručiček od osy x. Fotogrammetrické souřadnicové systémy jsou soustavy pravotočivé, s kladnou orientací.

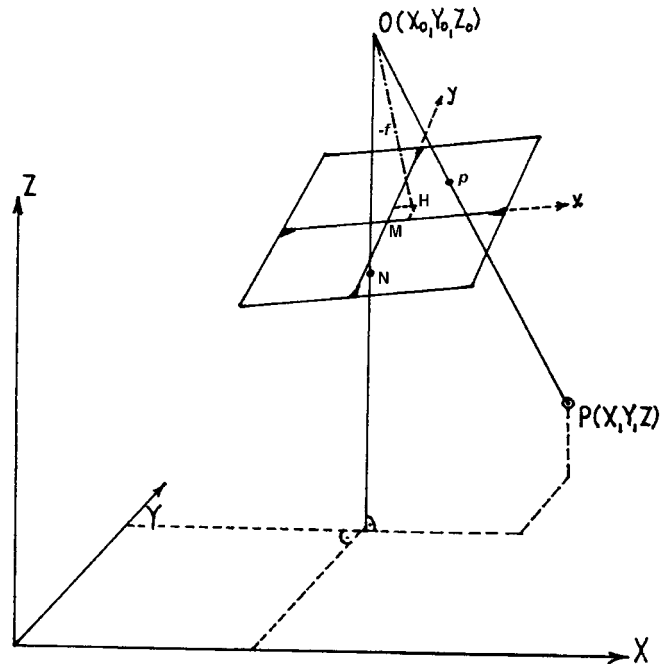
V důsledku centrální projekce se jednotlivé objekty na negativu zobrazují v geometricky převrácené poloze. Snímkové souřadnice jednotlivých bodů lze zjišťovat řadou přístrojů (měřítka, mono komparátory apod.). Souřadnice se měří s přesností jednotek mikrometrů a vyjadřují se často jako průměr z několika měření. Využívá se také různých zvětšovacích přístrojů, lup apod. Uvedená měření obsahují náhodné i systematické chyby, způsobené nepřesnostmi v optickém systému kamery, atmosférickou refrakcí, zakřivením Země, srážkou fotografického papíru apod. Pro běžná měření je možno řadu uvedených nepřesností zanedbat - vzhledem k chybám způsobeným odchylkami od tížnice jsou pouze chybami druhého řádu. Prakticky se provádí pouze opravy na srážku papíru.

Modelové souřadnice lze získat ze snímkových souřadnic při znalosti tzv. prvků vnější orientace pomocí prostorové pravouhlé podobnostní transformace. Modelové souřadnice se volí tak, aby osy x a y ležely ve stejné rovině jako konečný souřadnicový systém, ve kterém chceme souřadnice určovat a osa z je orientována ve směru měření výšek.

Významné body na LMS

Na LMS v obecné poloze (šikmé) lze definovat čtyři významné body důležité z hlediska jeho dalšího zpracování pro měřické účely:

- **Střed snímku** (centrální bod) – průsečík protějších rámových značek
- **Hlavní bod** (principal point) – kolmice na rovinu snímku procházející středem optického systému
- **Nadir** – tížnice k zemskému povrchu procházející středem optického systému
- **Fokální bod** (Isocenter) – bod nacházející se v polovině spojnice nadiru a hlavního bodu, prochází jím osa, podle které je šikmý snímek skloněn. Je to výchozí bod šikmé LF.



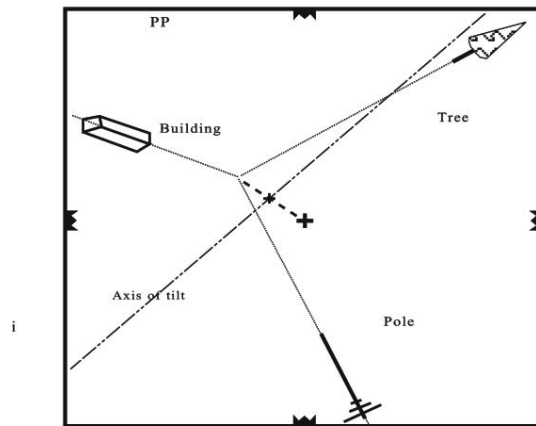
Obr. 4.5 Významné body na šikmé letecké fotografii: M – střed snímku, H – hlavní bod, O – střed optického systému, f - ohnisková vzdálenost, P – libovolný bod v terénu, p – obraz bodu P na fotografii

V tzv. ideálním případě (obr. 4.3) všechny čtyři body splývají, optická osa (kolmice k rovině snímku) je totožná s tížnicí k zemskému povrchu). Hlavní bod je určen kolmicí spuštěnou na rovinu snímku procházející středem optického systému. Naproti tomu nadir je na snímku definován jako průsečík svislice (tížnice) procházející středem optického systému s rovinou snímku (snímkový nadir). Obdobně nadir na zemském povrchu je potom určen jako průsečík svislice, procházející středem optického systému se snímaným terénem. Pro ideálně svislou fotografii je nadir totožný s hlavním bodem a se středem fotografie. Tento bod lze získat na průsečíku spojnic protějších rámových značek - tj. optický střed. fotografie.. Není-li osa záběru svislá, nadir i hlavní bod nejsou na fotografii totožné (obr 4.5). Nadir na fotografii je bod, do kterého se sbíhají všechny svislé předměty na ní zobrazené. Hlavní bod nemusí souhlasit se středem fotografie v případě, že došlo např. vinou srážky papíru k posunu průsečíku rámových značek.

Určení polohy významných bodů na fotografii

- Určení středu snímku a hlavního bodu – průsečík rámových značek, pokud nedošlo k výrazným distorzím z hlediska srážky papíru apod.
- Určení polohy nadiru (obr. 4.6) - všechny vysoké objekty se na LF naklánějí od nadiru. Nadir leží na průsečíku přímků proložených alespoň dvěma svislými objekty – věže, komíny, vysoké budovy (nesmí vytvářet přímků)
- Určení polohy fokálního bodu na šikmé LF (obr. 4.6): Fokální bod se nachází v polovině spojnice nadiru a hlavního bodu na šikmé LF, Kolmice na tuto spojnici

procházející fokální bodem definuje osu náklonu šikmé fotografie. Fokální bod je střed náklonu šikmé fotografie. Deformace způsobené náklonem LF (odchytkou od tížnice) mají radiální povahu a vycházejí právě od polohy fokálního bodu.



Obr. 4.6 Určení polohy nadiru a fokálního bodu na šikmém snímku

Vlivy působící na snímkové souřadnice

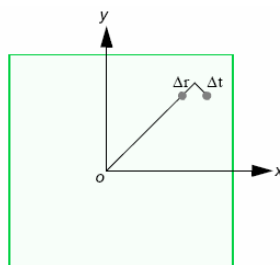
Fotografický snímek je středovým průmětem zobrazeného předmětu, při odchylkách od ideálního případu vznikají zkreslení. Tato zkreslení mohou být dále způsobena také vlastností použitých přístrojů, kolísáním výšky letu a u snímků malých měřítek také zakřivení zemského povrchu. Přesnost zobrazení obecně narušují tyto faktory (odchytky od ideálního případu):

- **optickým zkreslením** daným distorzí objektivu, refrakcí a zakřivením Země
- **mechanickým zkreslením** daným nerovnostmi filmové emulze či srážkou fotografického papíru
- **perspektivním zkreslením** daným členitostí předmětu (reliéfu)
- **projektivním zkreslením** daným sklonem snímku (odchytkou od tížnice) – viz. šikmá fotografie

Uvedená zkreslení ovlivňují přesnost vyhodnocení, působí na snímkové souřadnice a způsobují posuny radiálních vzdáleností o jisté hodnoty. Některé vlivy způsobují systematické chyby měření (srážka papíru, distorze objektivu), jiné mohou mít povahu chyb náhodných (refrakce). Ve fotogrametrii existují prostředky, kterými lze zmíněná zkreslení alespoň částečně eliminovat.

Vlivy distorze objektivu

Distorze objektivu zhoršují polohovou přesnost určení snímkových bodů. Vznikají díky ohybu paprsků přes optický systém kamery. Zavádějí se především pro širokoúhlé a zvláště širokoúhlé komory – způsobují na okrajích snímků chyby v řádu 10 až 200 mikrometrů.



Obr. 4.7 Efekt radiální a tangenciální distorze objektivu

Jak ukazuje obr. 4.7 distorze objektivu lze dělit na:

- radiální
- tangenciální

Radiální distorze (symetrická) způsobuje posuv bodů radiálním směrem od hlavního bodu. Tangenciální – působí kolmo k distorzi radiální. Je řádově menší a zanedbává se. Efekt distorze objektivu je uveden v kalibračním protokolu a udává se v něm jako funkce vzdálenosti od hlavního bodu. Nepřesnosti objektivu nejvíce ovlivňují polohu bodů na okrajích fotografie.

Vlivy srážky fotografického materiálu

V současné době jsou zanedbatelné, nutno s nimi počítat u archívních snímků či snímků z neměřických komor. Je-li srážka pravidelná, je možno ji eliminovat porovnáním se skutečnými souřadnicemi rámových značek. Nepravidelná srážka se odstraňuje obtížně, například pomocí tzv. reseau komor – komor s mřížkou. Nepřesnosti vyvolané srážkou filmu (negativu) lze často zanedbat, protože se pohybují v řádu 0,025 mm, nepřesnosti u fotografického papíru (pozitiv) jsou větší. Z tohoto důvodu se ve fotogrammetrii častěji využívá negativů či diapositivů.

Srážku papíru lze zjistit porovnáním vzdáleností protějších rámových značek z kalibračního protokolu a týchž vzdáleností přesně změřených na fotografii. Z poměru těchto dvou vzdáleností se vypočte tzv. korekční faktor, kterým se poté násobí každá souřadnice změřená ze snímku.

Vlivy způsobené tzv. smazem

Fotografie je exponována při pohybu nosiče – vlivem toho se každý bod exponuje na film jako úsečka a obrazy objektů na fotografii mohou být rozmazané (obr. 4.8). Tento efekt smazu M lze kvantifikovat pomocí vztahu, ve kterém se uplatňují:

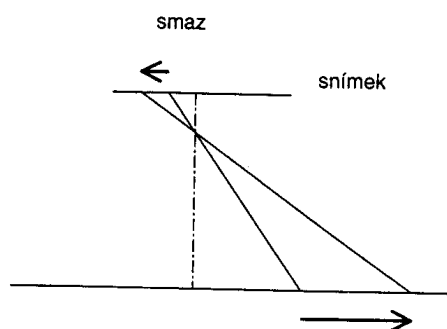
$$M = \frac{0,2778 \cdot n \cdot t \cdot f}{H_D}$$

n - rychlost pohybu letadla v km/h

t – doba expozice

f – ohnisková vzdálenost

H_D – výška letu nad srovnávací (referenční) rovinou



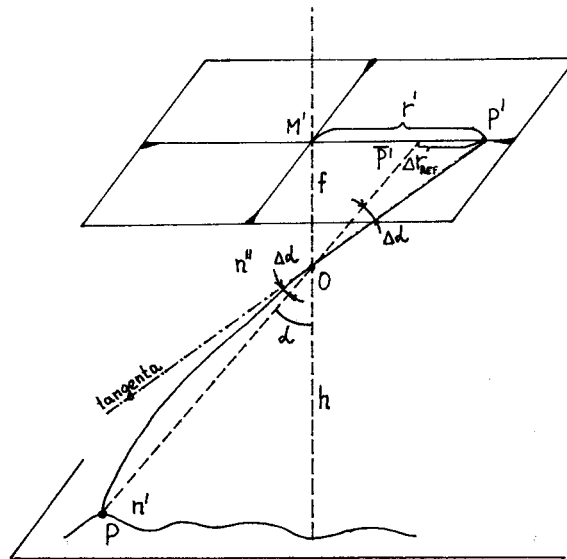
Obr. 4.8 Efekt tzv. smazu na letecké fotografii

U kvalitní fotografie je akceptovatelná hodnota smazu M kolem 0,05 mm. Ze vzorce je patrné, že pro kvalitní fotografii je nutné použít kratší doby expozice (a tedy rychlejšího filmu), nosiče s nižší rychlostí letu, pořizovat fotografii z větší výšky či použít kameru s kratší ohniskovou vzdáleností. Např. při rychlosti 180 km/h, expoziční době 1/200 sec a měřítku snímku 1: 10 000 je teoretický smaz 25 mikrometrů. Smaz je u současných kamer kompenzován řízeným pohybem filmu během expozice, tak aby byl bod zobrazován do stále stejného místa filmu (FMC – Forward Motion Compensation)

Vlivy atmosférické refrakce

V důsledku proměnlivé optické hustoty prostředí a v důsledku kolísání hodnot meteorologických prvků dochází k odklonu světelných paprsků od přímky (obr. 4.9). Obraz

snímaného bodu P' je posunut o hodnotu Δr_{REFR} , o kterou musíme opravit hodnoty snímkových souřadnic, aby byla splněna podmínka středového promítání. Vlivy atmosféry nelze dokonale odstranit – používá se modelu tzv. normální atmosféry s konstantními parametry. Velikost radiálních posunů bodů v závislosti na výšce letu a ohniskové vzdálenosti shrnuje tab. 4.1.



Obr. 4.9 Vlivy atmosférické refrakce na přesnost určení snímkových souřadnic

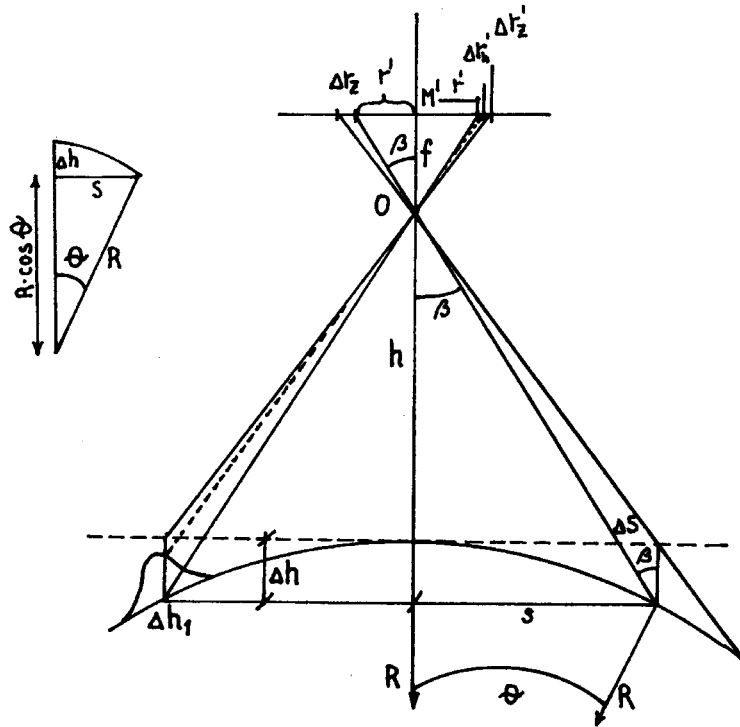
Vlivy refrakce způsobují prodloužení radiálních vzdáleností a projevují se především u snímků malých měřítek a u širokouhlých komor. U družicových snímků se prakticky neprojevuje.

Tabulka 4.1 Opravy snímkových souřadnic o atmosférickou refrakci (podle Pavelky, 1988)

Měřítko snímku	Výška letu h [km]	f [mm]	Δr_{REFR} [μm]
1 : 5 000	2,0	300	3
	1,3	150	3
	0,9	85	3
1 : 10 000	3,5	300	5
	2,0	150	4
	1,3	85	5
1 : 20 000	6,5	300	9
	3,5	150	8
	2,2	85	9
1 : 100 000	9,0	85	34
1 : 800 000	800	1000	2

Vlivy zakřivení Země

Vlivy zakřivení Země jsou dány volbou souřadného systému ve zvolené promítací rovině. Snímek je pořízen nad reálným tělesem. Opravu lze vypočítat pouze pro elipsoid. Změny radiální vzdálenosti vlivem zakřivení země uvádí tabulka 4.2. Zakřivení Země způsobuje záporné změny radiálních vzdáleností bodů na snímku (obr. 4.10). Obrazy bodů se tedy posouvají směrem ke středu snímku. Převýšení terénu nad srovnávací rovinou stejně tak jako atmosférická refrakce způsobují naopak kladné změny – obrazy bodů se posouvají směrem od středu snímku. Vlivy se tak do jisté míry kompenzují. Při požadavku na přesnost ve výškách 0,06 promile z výšky letu je nutné zavádět opravy ze zakřivení Země pro snímky pořízené komorou s normálním objektivem od měřítka 1 : 20 000, pro komory širokouhlé od 1 : 10 000.



Obr. 4.10 Vlivy zakřivení Země na přesnost určení snímkových souřadnic

Tabulka 4.2 Změny radiálních vzdáleností vlivem zakřivení Země (podle Pavelky, 1988)

Měřítko snímku	f [mm]	h [km]	Δr_z [μm]
1 : 5 000	85	0,4	10
	150	0,8	6
	300	1,5	3
1 : 10 000	85	0,8	17
	150	1,5	11
	300	3,0	6
1 : 20 000	85	1,7	40
	150	3,0	23
	300	6,0	11
1 : 30 000	85	2,5	60
	150	4,5	34
	300	9,0	17

Princip perspektivního zobrazení a radiálních posuvů na LMS

Perspektivní zobrazení je typické pro centrální projekci v případě, že na snímku jsou zobrazeny objekty s nesterajnou výškou. Vydeme-li z tzv. ideálního případu, je možné odvodit vztah pro měřítko snímku vytvořeného centrální projekcí z obr. 4.11.

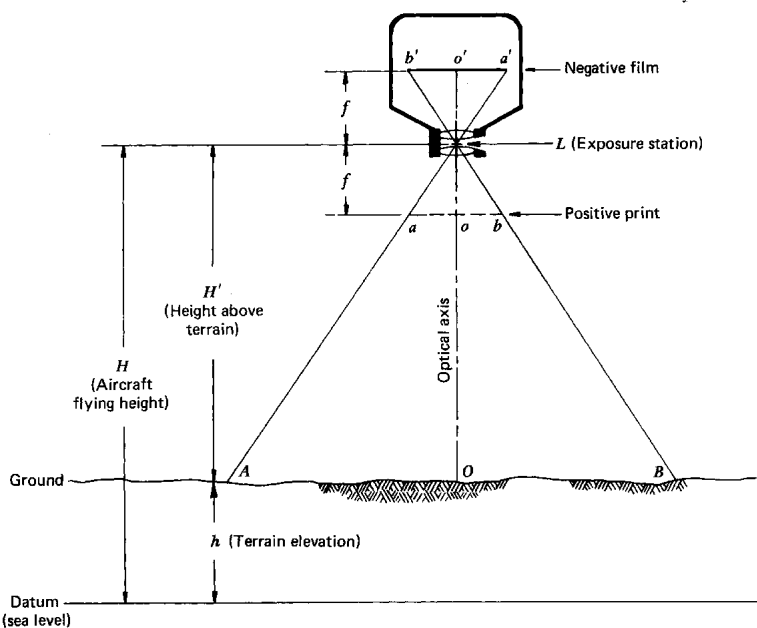
Měřítko snímku se určuje z poměru vzdálenosti mezi dvěma body na snímku a ve skutečnosti. Je funkcí ohniskové vzdálenosti f a výšky letu nad terénem H' . Z podobných trojúhelníků Lao a LAO na obr 4.10 plyne:

$$S = \frac{\overline{ao}}{\overline{AO}} = \frac{f}{H'} = \frac{f}{H - h}$$

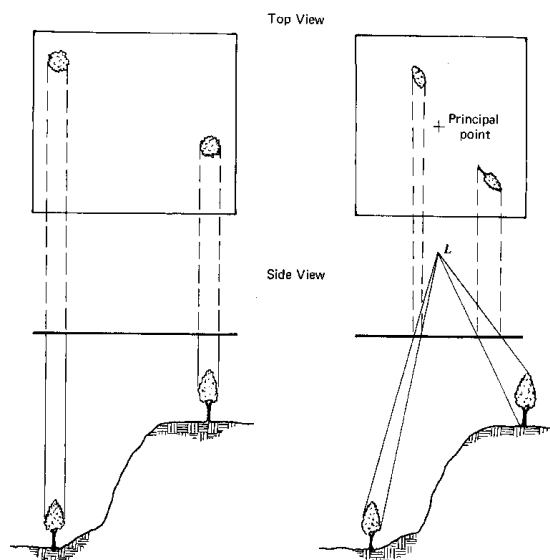
Z uvedeného je patrné, že v terénu s převýšeními bude mít fotografie rozdílná měřítko pro různé nadmořské výšky. Pro nepřekreslenou fotografii lze určit pouze přibližné měřítko:

$$S_{avg} = \frac{f}{H - h_{avg}}$$

Ke kolísání měřítka na fotografii tak dochází v důsledku nerovností snímaného terénu. Druhou příčinou je potom náklon u šikmé fotografie (viz. dále). Rozdíl mezi centrální projekcí letecké fotografie a pravoúhloú projekcí mapy prezentuje obr. 4.12.



Obr. 4.11 Svislá fotografie plochého terénu a určení měřítka snímku

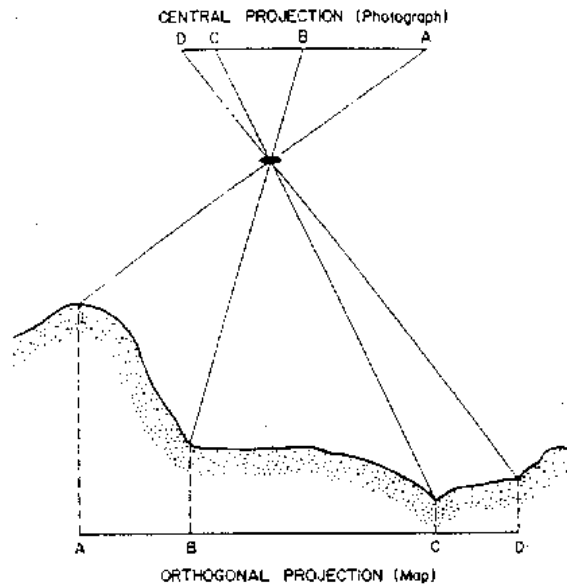


Obr. 4.12 Rozdíl mezi centrální projekcí letecké fotografie a pravoúhloú projekcí mapy

Body na fotografii zachycující nerovný terén jsou zobrazeny s tzv. radiálním posuvem. Mapa má tzv. ortografickou projekci, na druhé straně snímek je pořízen projekcí centrální. Na fotografii terén ve větší výšce leží blíže kameře a všechny objekty s vertikálním rozměrem jsou na fotografii znázorněny „z boku“. Jejich vrcholy se naklánějí směrem od středu snímku. Radiální posuv je přímo úměrný výšce objektu, nepřímo úměrný výšce letu nad terénem a přímo úměrný vzdálenosti od hlavního bodu. Extrémní posuv bude u vysokých objektů

nacházejících se na okraji snímku fotografovaných z malých výšek. Předměty ve vyšší nadmořské výšce jsou blíže ke kameře a jeví se jako větší než stejně veliké předměty níže položené.

Efektu radiálního posuvu podléhají i všechny body „nerovného“ terénu jak je patrné z obr. 4.13. V případě terénu se tento efekt označuje jako **relief displacement** – tj. relativní změny v poloze objektů v důsledku jejich odlišné výšky. Stejně vzdálenosti AB a CD v terénu se v důsledku nerovného terénu na LMS zobrazí výrazně odlišně ($a'b' > c'd'$).



Obr. 4.13 Podstata relativních změn v poloze objektů na svislé letecké fotografii reliéfu s převýšením

Cílem fotogrammetrického zpracování je získat skutečné (geodetické) souřadnice bodů z fotografických záznamů na základě měření jejich snímkových souřadnic. Spokojíme-li se s rovinnými geodetickými souřadnicemi, lze za jistých okolností (rovinné území) využít jednotlivých snímků (na základě projektivní transformace). Pokud požadujeme 3D souřadnice – nevystačíme s jedinou fotografií a musíme využít metod stereofotogrammetrie, tedy měření na překrývající se snímkové dvojici.