

8. Stereofotogrammetrie a orientace snímkové dvojice

Ve fotogrammetrii vyhodnocujeme častěji stereodvojice snímků než jednotlivé snímky. Pro vyhodnocení překrývajících se snímků a získání stereo-vjemu je nutné provést jejich orientaci. Orientace stereopáru a stereoskopické vyhodnocení má oproti jedno snímkovým metodám svá specifika.

Při vyhodnocování mohou obecně nastat dva případy. V prvním případě známe prvky vnější orientace a potom můžeme k orientaci přímo využít kolineárních rovnic a vlíčovacích bodů. V druhém případě neznáme prvky vnější orientace a určujeme je prostřednictvím tzv. relativní a absolutní orientace.

Prvky vnější orientace jsou známy

Známe-li prvky vnější orientace můžeme určit hodnoty prvků matice rotace M a využijeme kolineárních rovnic:

$$X = X_o + (Z - Z_o) \frac{m_{11}(x' - x'_o) + m_{12}(y' - y'_o) + m_{13}(-f)}{m_{31}(x' - x'_o) + m_{32}(y' - y'_o) + m_{33}(-f)}$$
$$Y = Y_o + (Z - Z_o) \frac{m_{21}(x' - x'_o) + m_{22}(y' - y'_o) + m_{23}(-f)}{m_{31}(x' - x'_o) + m_{32}(y' - y'_o) + m_{33}(-f)}$$

Změříme na obou snímcích snímkové souřadnice x'_1, y'_1 a x'_2, y'_2 určovaného bodu. Pro libovolný bod se třemi neznámými skutečnými souřadnicemi X, Y, Z můžeme sestavit čtyři kolineární rovnice (pro každý snímek ze stereopáru po dvou), které řešíme pro jednotlivé geodetické souřadnice. Z rovnic pro 1. a 2. snímek vypočteme nejprve hodnotu zlomku a označíme ji k_{x1}, k_{y1} pro 1. snímek a k_{x2}, k_{y2} pro 2. snímek.

Soustava čtyř rovnic má potom tvar:

$$X = X_{o1} + (Z - Z_{o1})k_{x1}$$
$$Y = Y_{o1} + (Z - Z_{o1})k_{y1}$$
$$X = X_{o2} + (Z - Z_{o2})k_{x2}$$
$$Y = Y_{o2} + (Z - Z_{o2})k_{y2}$$

Z nich můžeme vypočíst souřadnice X, Y , souřadnici Z vypočteme z 1. a 3. rovnice“

$$Z = \frac{X_{o2} - Z_{o2}k_{x2} + Z_{o1}k_{x1} - X_{o1}}{k_{x1} - k_{x2}}$$

Prvky vnější orientace nejsou známy

Pro řešení orientace snímkové dvojice v případě neznámých prvků vnější orientace můžeme použít jeden ze tří postupů:

- Určení prvků vnější orientace samostatně pro každý snímek (space resection)
- Určení prvků vnější orientace společně pro oba snímky (space forward intersection)
- Určení prvků vnější orientace ve dvou krocích: relativní a absolutní orientace

1. Určení prvků vnější orientace samostatně pro každý snímek (space resection)

Analogicky jako v případě jednosnímkových metod potřebujeme souřadnice minimálně 3 vlíčovacích bodů na každém snímku. Pro každý vlíčovací bod můžeme sestavit 2 kolineární rovnice pro snímkové souřadnice x, y . Tyto snímkové souřadnice jsou funkcí šesti neznámých prvků vnější orientace:

$$x = f(X_o, Y_o, Z_o, \omega, \varphi, \kappa)$$
$$y = f(X_o, Y_o, Z_o, \omega, \varphi, \kappa)$$

Z minimálně tří vlíčovacích bodů získáme soustavu minimálně šesti rovnic, které řešíme pro šest neznámých parametrů vnější orientace. Uvedený postup se označuje jako prostorové

protínání zpět (space resection). Jeho nevýhodou je potřeba velkého počtu vlíčovacích bodů, které navíc musejí být body úplnými (musíme znát všechny tři souřadnice X, Y, Z).

2. Určení prvků vnější orientace společně pro oba snímky (space forward intersection)

V případě stereopáru můžeme sestavit pro jeden úplný vlíčovací bod 4 rovnice:

$$x_1 = f(X_{O1}, Y_{O1}, Z_{O1}, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1)$$

$$y_1 = f(X_{O1}, Y_{O1}, Z_{O1}, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1)$$

$$x_2 = f(X_{O2}, Y_{O2}, Z_{O2}, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2)$$

$$y_2 = f(X_{O2}, Y_{O2}, Z_{O2}, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2)$$

Pro libovolný určovaný bod P potom lze sestavit opět 4 rovnice, kde však jsou navíc tři neznámé (X_p, Y_p, Z_p):

$$x_1 = f(X_{O1}, Y_{O1}, Z_{O1}, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1, X_p, Y_p, Z_p)$$

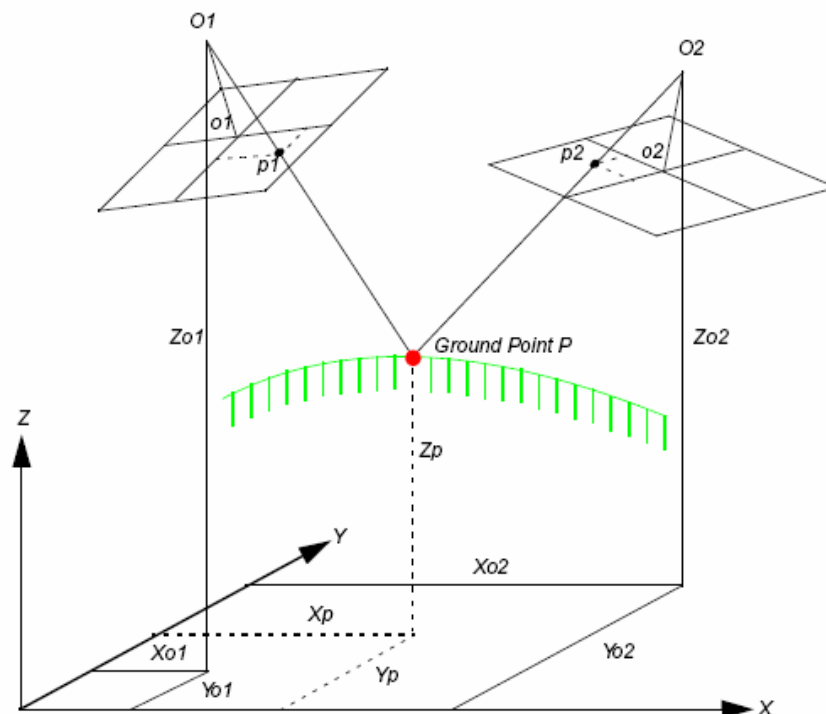
$$y_1 = f(X_{O1}, Y_{O1}, Z_{O1}, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1, X_p, Y_p, Z_p)$$

$$x_2 = f(X_{O2}, Y_{O2}, Z_{O2}, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2, X_p, Y_p, Z_p)$$

$$y_2 = f(X_{O2}, Y_{O2}, Z_{O2}, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2, X_p, Y_p, Z_p)$$

Vzhledem k počtu neznámých tak získáme soustavu rovnic s velkým počtem nadbytečných rovnic. Neznámé prvky vnější orientace i souřadnice nových bodů získáme řešením této soustavy s využitím vyrovnání metodou nejmenších čtverců.

Princip určení prvků vnější orientace společně pro překrývající se dvojici snímků metodou **prostorového protínání vpřed** (space forward intersection) ukazuje obr. 8.1. Jak je z obrázku patrné, paprsky procházející obrazem identického bodu P na levé a pravé fotografii orientovaného stereopáru se v prostoru protínají v jednom bodě, pro který lze sestavit čtyři rovnice kolinearity (2 snímky x 2 souřadnice).



Obr. 8.1. Určení souřadnic X, Y, Z na modelu vytvořeném ze stereopáru

Výhodou tohoto postupu je, že vyžaduje daleko menší počet vlíčovacích bodů než v případě předchozí metody a navíc lze použít i tzv. neúplné body. Řešení je např. možné, pokud máme dva vlíčovací body s rovinnými souřadnicemi a tři vlíčovací body s výškami.

Příklad:

Máme k dispozici jeden úplný vlčovací bod, 2 body neúplné (známe jen x,y a další dva neúplné body, kde známe pouze z. Určujeme souřadnice pěti nových bodů.

Počet neznámých: 2 * 6 prvků vnější orientace
5 * 3 souřadnic určovaných bodů
2 * 1 a 2 * 2 neznámých souřadnic vlčovacích bodů

Celkem: **33 neznámých**

Počet rovnic: 5 + 5 tj. 10 bodů krát 4 rovnice pro každý z nich tj. **40 rovnic**

3. Určení prvků vnější orientace ve dvou krocích: relativní a absolutní orientace

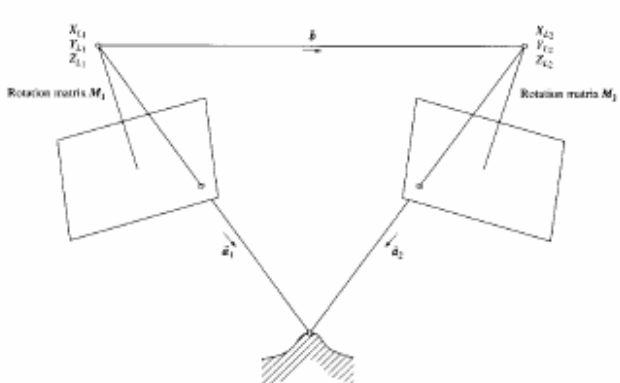
Orientace se provádí ve dvou krocích. Relativní orientací se vytvoří libovolně prostorově orientovaný stereomodel. Ten je následně transformován pomocí vlčovacích bodů tzv. absolutní orientací (pootočením, posunem a změnou měřítka) do geodetického souřadného systému. Pro orientaci dvojice snímků potřebujeme znát 12 prvků vnější orientace (dva snímky po šesti prvcích – tři souřadnice a tři úhly rotace). Při absolutní orientaci je určeno 7 prvků, zbývajících pět musí být určeno při orientaci relativní.

Relativní orientace

Relativní orientace je vzájemná orientace mezi oběma stereosnímky a zajišťuje se rotací kolem os x, y a z – tedy nastavením původní pozice a úhlové orientace fotografií v době jejich expozice.

Relativní orientace je určena bez vztahu k geodetickému systému souřadnic a proto nevyžaduje vlčovací body, ale pouze body, které jsou dobře identifikovatelné na obou snímcích stereoskopické dvojice. Stereoskopický model vznikne tehdy, nebudou-li rušivě působit tzv. vertikální paralaxy q . Tato podmínka je obecně splněna, jsou-li vertikální paralaxy odstraněny na pěti dobře rozmístěných orientačních bodech stereomodelu. Tedy relativní orientace modelu je dosaženo, pokud se odpovídající si paprsky (tzv. homologické) protnou alespoň v 5 bodech. Při určování prvků relativní orientace se vychází z různých podmínek, jejichž splnění zaručuje vyřešení relativní orientace. Mezi tyto podmínky patří podmínka koplanarity a podmínka nulových vertikálních paralax.

- **podmínka koplanarity** – odpovídající si paprsky stereodvojice musí ležet v jedné rovině s fotogrammetrickou základnou. Tuto podmínku vyjadřuje obr. 8.2.


$$\vec{b} = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{L_2} - X_{L_1} \\ Y_{L_2} - Y_{L_1} \\ Z_{L_2} - Z_{L_1} \end{bmatrix}$$
$$\vec{a}_1 = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \end{bmatrix} = M_1^T \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{bmatrix}_1$$
$$\vec{a}_2 = \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ w_2 \end{bmatrix} = M_2^T \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{bmatrix}_2$$

\vec{b} , \vec{a}_1 and \vec{a}_2 are coplanar $\Rightarrow \vec{b} \cdot (\vec{a}_1 \times \vec{a}_2) = 0$

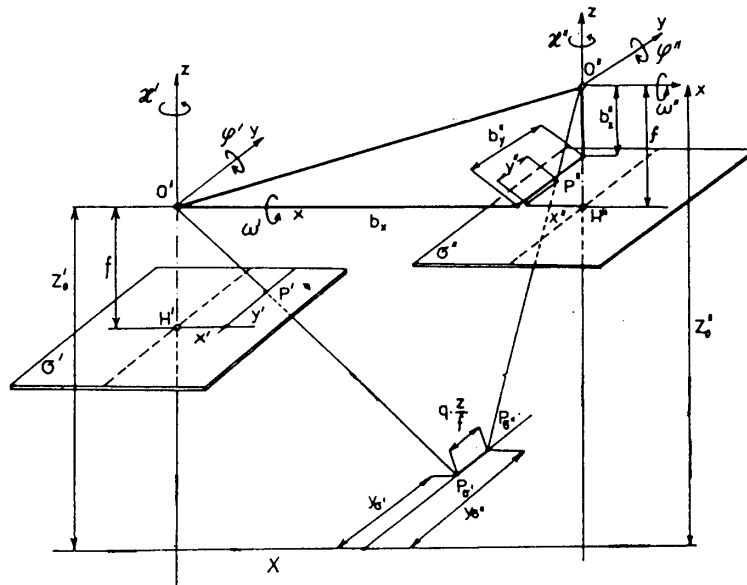
Therefore, the determinant of the vector components ends up zero \Rightarrow

$$F = \begin{vmatrix} b_x & b_y & b_z \\ u_1 & v_1 & w_1 \\ u_2 & v_2 & w_2 \end{vmatrix} = 0$$

Obr. 8.2. Podmínka koplanarity při relativní orientaci stereopáru

Matematicky lze podmínku koplanarity vyjádřit součinem tří vektorů

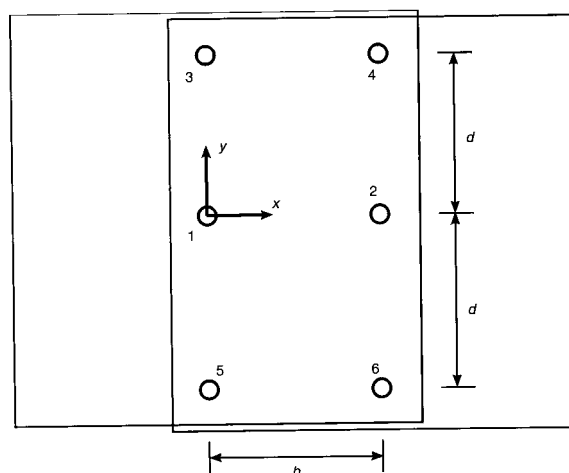
- **podmínka nulových vertikálních paralax** – vertikální paralaxy jednotlivých bodů ve stereoskopickém modelu jsou rovny nule (obr. 8.3)



Obr. 8.3. Podmínka nulových vertikálních paralax při relativní orientaci stereopáru

Prakticky se relativní orientace provádí dvěma postupy. Postup označovaný jako „**nezávislá dvojice**“ spočívá v pouhé rotaci, kdy se snímky otáčejí, ale nemění polohu (mění se orientace obou snímků). Druhý postup, tzv. „**připojení snímku**“ nechává první snímek fixní, otáčí a posouvá se pouze druhý snímek.

Relativní orientace se řeší numericky s využitím kolineárních rovnic sestavených mezi snímkovými (x', y', z') a modelovými souřadnicemi (x_m, y_m, z_m) . Lze využít jakýchkoliv dobře identifikovatelných bodů na snímcích, není třeba znát jejich geodetické souřadnice. Rovnice se však většinou řeší pro body **vhodně rozmístěné** na stereopáru – např. podle tzv. von Gruberova schématu (viz. obr. 8.4). Pokud se rozmístění bodů liší od ideálních poloh, přesnost určení prvků relativní orientace klesá.



Obr. 8.4 Rozmístění bodů podle tzv. von Gruberova schématu

Během relativní orientace se určí **pět** neznámých prvků vnější orientace: rozdíl příčných úhlů sklonu levého a pravého snímku $d\omega = \omega_1 - \omega_2$, podélný sklon levého a pravého snímku φ_1, φ_2 , potočení levého a pravého snímku κ_1, κ_2 .

(Pozn. V tomto případě jsou modelové souřadnice x_m, y_m, z_m souřadnicemi relativně orientovaného stereopáru a nemusí mít osy rovnoběžné se systémem geodetických souřadnic – viz. odvození matice rotace).

Absolutní (geodetická) orientace řeší vztah mezi modelovými a geodetickými souřadnicemi vlčovací bodů a to posunem, pootočením a náklonem relativně orientovaného modelu do referenčního geodetického systému souřadnic. Absolutní orientaci můžeme vyjádřit vztahem:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{pmatrix} + kM \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}$$

V tomto vztahu je sedm parametrů ($X_o, Y_o, Z_o, \omega, \varphi, \kappa, k$) označováno jako prvky absolutní orientace. Pro jejich určení je zapotřebí minimálně sedmi rovnic. Absolutní orientace zajišťuje změnu měřítka tak, aby obrazy vlčovacích bodů na snímku se ztotožnily s jejich obrazy na mapě. Určení zbývajících sedmi neznámých prvků vnější orientace se provádí nejčastěji pomocí vlčovacích bodů metodou nejmenších čtverců s využitím rotační matice M (viz. výše).

Absolutní orientace vyžaduje minimálně dva úplné vlčovací body a jeden výškový bod, případně dva rovinné body a tři body výškové. Tyto body přitom nesmí ležet v jedné přímce.

V průběhu absolutní orientace stereopáru se určuje měřítko modelu (základna $b_x, X''-X'$, posun modelu ve směru os X, Y, Z , pootočení celého modelu a horizontace modelu.

Tvorba topografických map fotogrammetrickými metodami

Po provedení relativní a absolutní orientace stereopáru je možné provádět jeho vyhodnocování. To může spočívat v možnosti určování geodetických souřadnic X, Y, Z jakéhokoliv bodu na překrývajících se fotografiích. Jsou-li známy prvky vnější orientace, potom v těchto čtyřech rovnicích jsou pouze tři neznámé – souřadnice X, Y, Z vyšetřovaného bodu. Řešením soustavy čtyř rovnic obdržíme hledané geodetické souřadnice bodu. Postupným řešením soustavy rovnic pro každý bod (pixel v digitálním snímku) lze např. sestavit výškový model pro překrytovou část stereopáru. Tohoto postupu lze velmi výhodně využít v případě digitální fotogrammetrie pro tvorbu DTM metodou tzv. obrazové korelace (viz. dále).

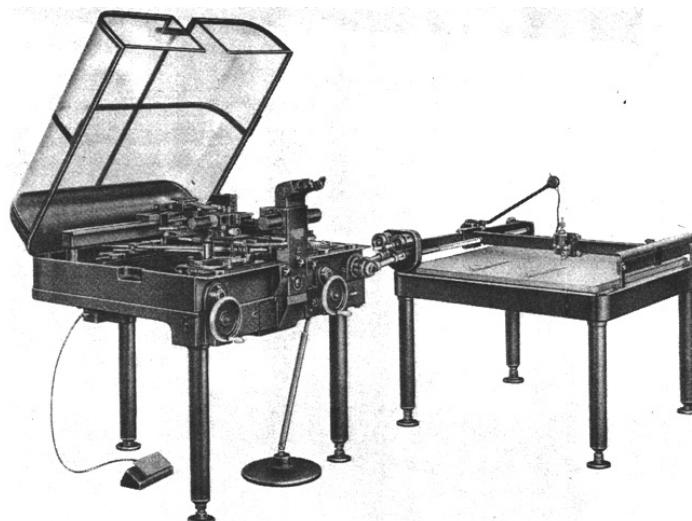
Diferenciální překreslování, Stereoskopická kreslicí zařízení.

Jednou z hlavních aplikací fotogrammetrických metod je přesné topografické mapování. Přesnými přístroji, které slouží k tomuto účelu jsou tzv. **stereoplottery** (stereoskopická kreslicí zařízení – obr. 8.5). Stejně jako v případě celé fotogrammetrie, lze i stereoskopická kreslicí zařízení dělit na zařízení **analogová, analytická a digitální**. Jejich princip fungování je však stejný. Je založen na rekonstrukci polohy všech bodů na stereoskopické dvojici snímků. Paprsky jsou rekonstruovány analogovou či analytickou metodou a nebo pomocí počítače (digitální stereoplotter).

Každá fotografie ve stereopáru je výsledkem projekce paprsků z terénu skrze optický systém na snímkovou rovinu. Ve stereoplotteru je směr projekce opačný. Paprsky z fotografie jsou promítány ve stejné relativní orientaci, ve které byly vytvořeny tak, že vytvářejí zdánlivý trojrozměrný model z překrývajících se částí. Model lze nejenom prohlížet, ale lze na něm i měřit a převést ho do mapy.

Klasický stereoplotter má tři základní součásti:

1. projekční systém (vytváří model terénu)
2. zobrazovací systém (umožňuje stereoskopické pozorování)
3. měřicí systém (měření výšek či překreslování objektů na mapu)

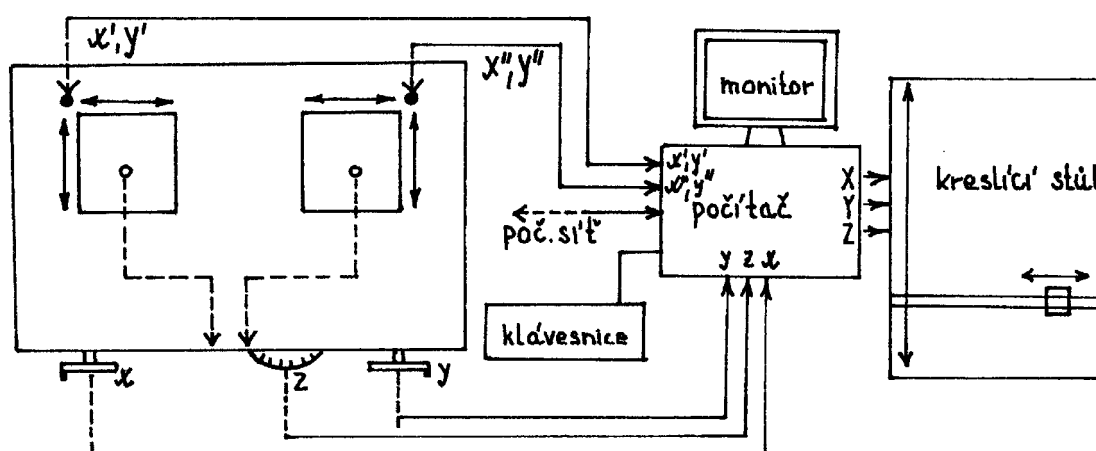


Obr. 8.5 Analogový stereoplottter

Opticko mechanický stereoplottter

Stereomodel je promítán na stůl s malým světelným bodem ve středu. Tento bod je „plovoucí značkou“, jejíž výšku lze upravovat pohybem stolu ve vertikálním směru tak, aby tato měříčská značka se nacházela přímo na povrchu stereomodelu. Protože stereomodel byl absolutně orientován ke skutečným souřadnicím, lze výšku měříčské značky převést přímo na nadmořskou výšku. Objekty ze snímku jsou přenášeny planimetry jejich „překreslováním“ a upravováním polohy plovoucí značky tak, aby byla vždy v kontaktu se stereomodelem. Tímto „diferenciálním“ překreslováním jsou postupně odstraněny chyby vzniklé centrální projekcí a nestejnou výškou objektů. Uvedený způsob dovoluje překreslovat vrstevnice - výška měříčské značky (stolu) se upraví na určitou (nadmořskou) výšku - vrstevnici - a plovoucí značkou se pohybuje po stereomodelu tak, aby se ho neustále dotýkala. Poloha měříčské značky je spojena se souřadnicovým zapisovačem, který vykresluje postupně prvky výsledné topografické mapy.

Analytický stereoplottter - Stereomodel je vytvářen matematicky, za pomoci výpočetní techniky. Systém nemá optická či mechanická omezení, je přesnější. Do počítače se zadávají podpůrná data pro vnitřní orientaci. Externí orientace (relativní a absolutní) probíhá automaticky na základě znalosti přesné polohy rámových značek a několika vličovacích bodů.

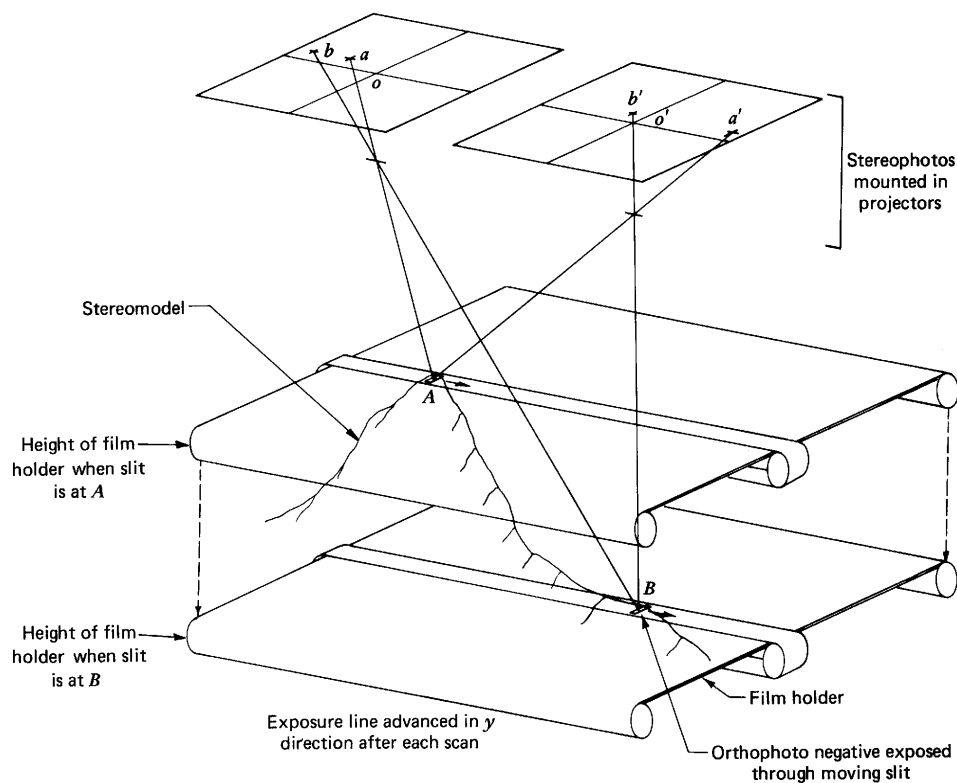


Obr. 8.6 Schéma analytického stereoplottteru

Tvorba ortofoto

„Ortografická fotografie“ vzniká na základě odstranění všech distorzí včetně relativních změn v poloze objektů vzniklých v důsledku jejich rozdílné nadmořské výšky. Ortofoto může být vytvářeno v analogové i digitální podobě, princip vzniku u obou forem je podobný. V analogové podobě je ortofoto vytvářeno v přístroji zvaném **ortofotoskop** (obr. 8.7).

Ortofotoskop je založen na stejném principu jako výše popsany stereoplotter, avšak na místo překreslování vybraných objektů do mapy jsou postupně přenášeny všechny body stereomodelu fotografickou cestou do tzv. negativu ortofoto. Měřickou značku v uvedeném přístroji vytváří úzká štěrbinu, kterou dopadá světlo na film. Skrze štěrbinu je malá plocha negativu exponována. Štěrbinu skenuje zdánlivý model vytvořený ze stereopáru v úzkých prouzcích. V průběhu skenování operátor udržuje výšku držáku s filmem v takové výšce, aby se štěrbinu opět neustále dotýkala povrchu stereomodelu. Uvedený způsob vzniku ortofoto se také označuje jako „**on line**“. Naproti tomu „**off line**“ způsob nejprve skenuje stereomodel plovoucí měřickou značkou a její výška je vždy zaznamenávána v digitální podobě na vhodné médium. Těchto záznamů je následně využíváno pro automatické nastavování výšky držáku s filmem a jeho exponování. Tento způsob umožňuje upravit rychlost skenování podle komplexnosti terénu.



Obr. 8.7 Princip tvorby ortofotomapy

Princip tvorby ortofoto ze stereoskopické dvojice snímků je založen na odečítání výšek jednotlivých elementárních částí obrazu. Nositelem informace o výšce je rozdíl horizontálních paralax. K jeho určení je nutné identifikovat totožné (sdužené) body na levém a pravém snímku a odečíst jejich snímkové souřadnice.

Pokud se ze stereopáru vytváří zdánlivý model zpracovávaného území, lze sdužené body identifikovat pomocí měřické značky nastavované na zdánlivý model (viz. obr. 8.7). V případě digitálních snímků lze celý proces zautomatizovat s využitím algoritmů obrazové korelace (viz. dále).

Snímkové triangulace a využití vlíčovacích bodů ve fotogrammetrii

Pro výpočet prvků vnější orientace je v současné době stále ještě nutné použití tzv. vlíčovacích bodů. Přesné určení jejich souřadnic je rozhodující pro přesnost většiny fotogrammetrických produktů.

Vlíčovací body (GCP - Ground Control Points)

V minulosti se geodetické souřadnice vlíčovacích bodů určovaly triangulací a byly vyznačeny přímo v terénu. V současnosti jsou zaměřeny pomocí GPS a vyvrtány do negativu LMS před jeho skenováním. Vlíčovací body mohou být horizontální – je známo X, Y a nebo body vertikální (známa souřadnice Z). Nejlepší jsou body se všemi třemi souřadnicemi X, Y, Z. Body mohou být signalizované (značené) a nesignalizované. Běžné druhy nesignalizovaných bodů představují:

- křížení komunikací a jiných linií na zemském povrchu
- objekty infrastruktury (hydranty, studny, paty sloupů, ...)
- styk hranic zemědělských ploch (?!)

Současné způsoby určování souřadnic GCP:

- klasická geodetická měření (přesnost mm až cm)
- měření totálními stanicemi (přesnost mm až cm)
- pozemní měření metodou GPS (přesnost cm až m)
- určování z topografických map (přesnost závisí na měřítku a přesnosti mapy – řádově metry)
- digitální ortorektifikované snímky (lze určit X a Y v závislosti na měřítku ortofoto)
- DEM pro určování Z souřadnice (přesnost závisí na měřítku a rozlišení modelu terénu – řádově metry)

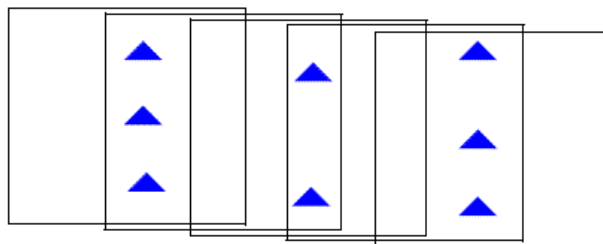
Z metod využívajících postupů aerotriangulace (viz. dále) vyplývá, že je potřebný více než minimální počet GCP. Minimální počet GCP závisí na počtu snímků a velikosti projektu. Teoretické minimum je dva body s X, Y a Z souřadnicemi a jeden bod s Z souřadnicí – tedy 7 měření. Toto minimum sedmi měření postačuje k určení sedmi parametrů absolutní orientace, kterými určíme vztah mezi snímkovými (image space) a reálnými souřadnicemi (object space):

- změna měřítka
- tři hodnoty X, Y a Z určující rozdíl v poloze
- tři hodnoty rotačních úhlů (ω , φ , κ) zaznamenávajících rozdíly v orientaci

Jednoznačné řešení tedy vyžaduje znalost minimálně sedmi parametrů. Znalost souřadnic dalších GCP je nezbytná k zvýšení přesnosti vyrovnání. Následující scénáře uvádějí potřebný (optimální) počet parametrů:

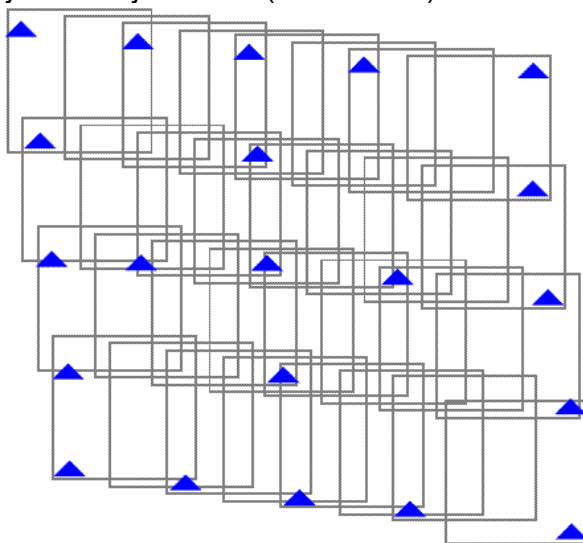
Zpracování jednoho snímku - minimální počet GCP je tři u nichž jsou známy X, Y a Z souřadnice a body jsou vhodně rozmístěny (neleží v přímce)

Zpracování řady snímků – je doporučeno mít dva GCP pro každý třetí snímek. Pro zvýšení přesnosti se navíc doporučuje mít tři body na začátku a konci řady (viz. obr. 8.8)



Obr. 8.8 GCP body pro zpracování řady snímků

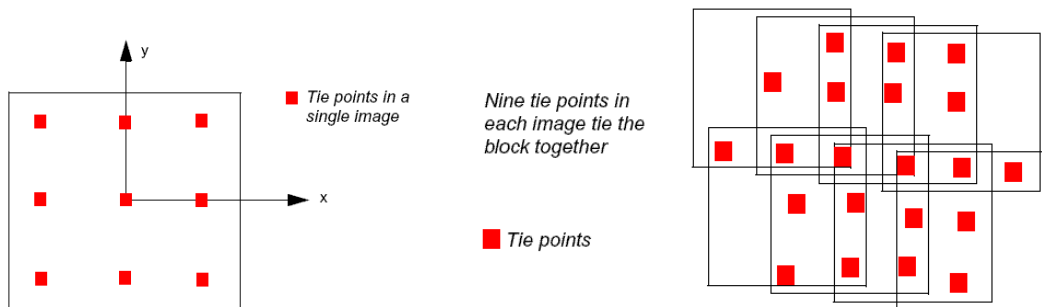
Zpracování bloku snímků – v závislosti na počtu snímků v bloku vytvářejí GCP síť. Je doporučeno mít minimálně jeden bod na každý třetí snímek v bloku. Pokud to umožňuje větší překryv snímků je výhodné mít body v místech vícenásobných překryvů. Dále je vhodné mít GCP rozmístěny po vnějších okrajích bloku (viz. obr. 8.9)



Obr. 8.9 GCP body pro zpracování bloku snímků

Vázací body (tie points)

Jsou to body, jejichž geodetické souřadnice nejsou známy, jsou však dobře lokalizovatelné a tedy změřitelné na překrývajících se částech dvou či více snímků. Reálné souřadnice těchto bodů jsou vypočteny v procesu aerotriangulace. Vázací body mohou být určovány manuálně i automatickým vyhledáváním. Musí být definovány na všech snímcích a to v místech s dobrým kontrastem obrazu. Dále by měly být vhodně rozmístěny po ploše snímku. Typickou konfiguraci devíti vázacích bodů vhodnou pro aerotriangulaci a rozmístění vázacích bodů v bloku snímků se standardním podélným překryvem 60% a 25-30% příčným překryvem ukazuje obr. 8.10.



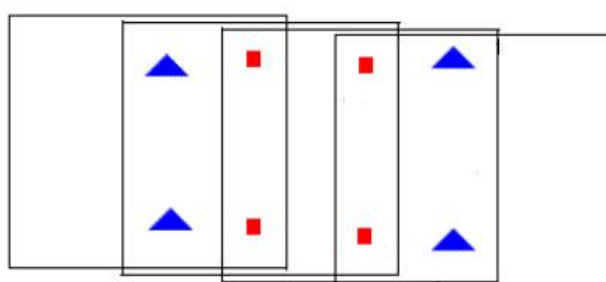
Obr. 8.10 Vhodné rozmístění vázacích bodů pro aeritriangulaci na jednom snímku a na bloku snímků

Automatický sběr vázacích bodů

Manuální sběr souřadnic vázacích bodů je značně namáhavý a neekonomický. Proto byla v posledních letech věnována značná pozornost zautomatizování tohoto procesu. Existuje několik metod, většina je založena na obrazové korelaci. Algoritmy mimo jiné také automatizují transfer vázacích bodů na překrývajících se snímcích, detekci hrubých chyb, výběr bodů apod.

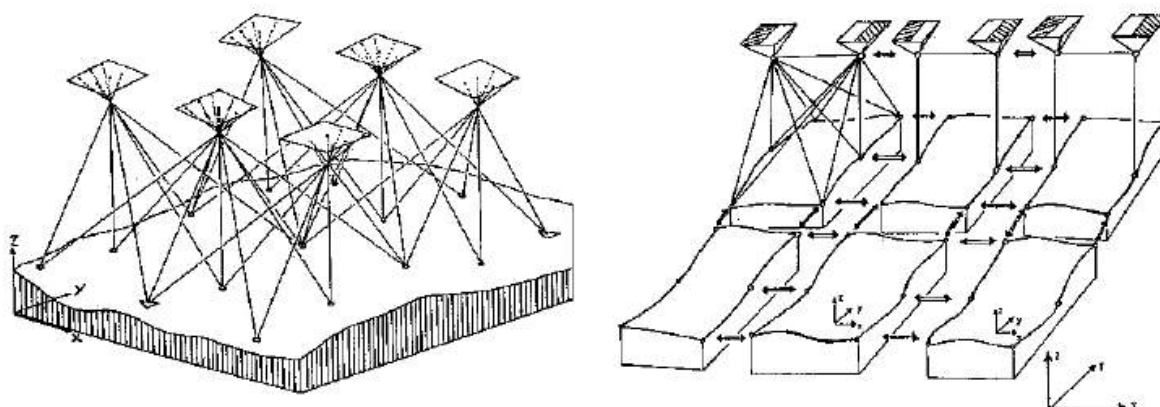
Snímkové triangulace (Aerotriangulace)

Metody GPS značně zjednodušily práce spojené s určováním souřadnic vlíčovacích bodů ve srovnání s jejich určováním klasickými geodetickými metodami. Práce spojené se získáváním souřadnic vlíčovacích bodů stále významně ovlivňují jak přesnost, rychlost i hospodárnost fotogrammetrických prací. Pro projekty mapování zpracovávající více než dva snímky je využití výše zmíněných technik zpětného protínání (metoda pro jeden snímek se třemi vlíčovacími body) a prostorového protínání vpřed (metoda pro překrývající se dvojici snímků s využitím kolineárních rovnic) omezené. Například prvky vnější orientace nejsou dostatečně přesně známy pro všechny snímky. Metodami GPS a IMS jsou určeny pouze jejich první přibližné aproximace. Metody dále vyžadují velký počet GCP. Např. zpracování 30 snímků metodou zpětného protínání vyžaduje minimálně 90 GCP. Navíc jejich zaměření je časově i finančně náročné. Z těchto důvodů byly vyvinuty metody tzv. **snímkových triangulací**. Snímkové triangulace řeší, jak se vyhnout měření velkého množství bodů, případně jak překlenout území bez vlíčovacích bodů. Princip aerotriangulace může vyjadřovat obr. 8.11.



Obr. 8.11 Princip aerotriangulace

U metod snímkové aerotriangulace jsou parametry vnější orientace určeny pro všechny snímky v bloku vyrovnáním metodou nejmenších čtverců. Je to statistická metoda, kterou se definuje vztah mezi všemi snímky v bloku, kamerou a terénem. Přitom se hledá řešení s nejmenší možnou chybou, která je zároveň rozdělena (distribuována) do všech vyrovnávaných GCP bodů (a tedy i snímků).



Obr. 8.12 Schematické znázornění komplexního a etapového řešení analytické aerotriangulace

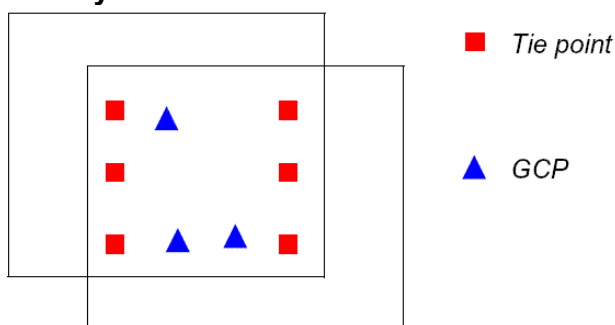
Svazkové vyrovnání bloku

Metody analytické aerotriangulace lze rozdělit na metody využívající etapového řešení a metody komplexní. Při tzv. komplexním řešení (obr. 8.12 vlevo) se všechny modely orientují současně metodami relativní a absolutní orientace s využitím vyrovnání souřadnic vlíčovacích bodů. Tento postup je dnes nejvyužívanější a označuje se jako **svazkové vyrovnání bloku** (block bundle adjustment). Výpočet probíhá na základě kolineárních rovnic (viz. kapitola 5) iteračním postupem (opakovaným výpočtem), kdy na počátku jsou určeny

přibližné hodnoty neznámých, které se v následujících iteracích dále zpřesňují. Neznámými jsou jednak prvky vnější orientace, jednak souřadnice nově určovaných bodů. Přibližné hodnoty neznámých prvků vnější orientace se získávají z měření GPS a nebo jsou souřadnice projekčních center určeny v projektu snímkového letu (vykreslením do mapy a odečtením souřadnic). V případě blokového vyrovnání se jedná o řešení rozsáhlých soustav rovnic, které jsou tzv. „silně přeuročené“. To znamená, že máme k dispozici větší počet rovnic než počet neznámých. Každý podrobný bod P určovaný na stereopáru přináší 4 rovnice (2 snímky \times 2 souřadnice x, y) a dále tři neznámé souřadnice X_P, Y_P, Z_P . Vyrovnání potom probíhá metodou nejmenších čtverců.

Při etapovém řešení (obr. 8.12 vpravo) se postupně sestavují do jednoho bloku jednotlivé snímky řešením jejich vzájemné orientace. Tedy snímkové souřadnice ze všech snímků se transformují do soustavy prvního snímku, například za podmínky, že body předcházejícího modelu musí ležet na odpovídajících si paprscích modelu následujícího.

Příklad metody blokového vyrovnání



Obr. 8.13 Dvojice překrývajících se snímků s vlíčovacími a vázacími body

Jak je patrné z obrázku 8.13 máme dva překrývající se snímky se třemi vlíčovacími body (GCP), jejichž geodetické souřadnice X, Y, Z známe. Dále je k dispozici šest tzv. vázacích bodů (tie points). Nyní je třeba sestavit rovnice kolinearit. Pro každý měřený GCP bod máme dvě snímkové souřadnice (x, y). Tedy lze sestavit dvě kolinéární rovnice pro definování vztahu mezi GCP bodem a jeho obrazem na snímku. V metodě svazkového blokového vyrovnání se tyto označují jako pozorovací (observační rovnice). Tedy GCP bodu A měřenému na překrývajících se části obou snímků přísluší čtyři kolinéární rovnice:

$$x_{a_1} - x_o = -f \left[\frac{m_{11}(X_A - X_{o_1}) + m_{12}(Y_A - Y_{o_1}) + m_{13}(Z_A - Z_{o_1})}{m_{31}(X_A - X_{o_1}) + m_{32}(Y_A - Y_{o_1}) + m_{33}(Z_A - Z_{o_1})} \right]$$

$$y_{a_1} - y_o = -f \left[\frac{m_{21}(X_A - X_{o_1}) + m_{22}(Y_A - Y_{o_1}) + m_{23}(Z_A - Z_{o_1})}{m_{31}(X_A - X_{o_1}) + m_{32}(Y_A - Y_{o_1}) + m_{33}(Z_A - Z_{o_1})} \right]$$

$$x_{a_2} - x_o = -f \left[\frac{m'_{11}(X_A - X_{o_2}) + m'_{12}(Y_A - Y_{o_2}) + m'_{13}(Z_A - Z_{o_2})}{m'_{31}(X_A - X_{o_2}) + m'_{32}(Y_A - Y_{o_2}) + m'_{33}(Z_A - Z_{o_2})} \right]$$

$$y_{a_2} - y_o = -f \left[\frac{m'_{21}(X_A - X_{o_2}) + m'_{22}(Y_A - Y_{o_2}) + m'_{23}(Z_A - Z_{o_2})}{m'_{31}(X_A - X_{o_2}) + m'_{32}(Y_A - Y_{o_2}) + m'_{33}(Z_A - Z_{o_2})} \right]$$

kde x_{a_1}, y_{a_1} jsou snímkové souřadnice na prvním (levém) snímku a x_{a_2}, y_{a_2} jsou snímkové souřadnice na druhém (pravém) snímku a dále $X_{o_1}, Y_{o_1}, Z_{o_1}$ resp. $X_{o_2}, Y_{o_2}, Z_{o_2}$ jsou tři prvky vnější orientace prvního resp. druhého snímku. Členy m_{11} až m_{33} resp. m'_{11} až m'_{33} jsou prvky rotační matice pro první resp. druhý snímek.

Jsou-li tedy k dispozici 3 GCP na překrývající se části dvou snímků, lze sestavit 12 kolineárních rovnic (4 rovnice pro každý GCP). Navíc, pokud bylo změřeno 6 vázacích bodů na překrývající se části dvou snímků, lze z nich sestavit dalších 24 rovnic. Tedy celkem je k dispozici soustava 36 rovnic.

Tato soustava rovnic má pro výše uvedený scénář následující počet neznámých:

- Šest prvků vnější orientace pro levý snímek ($X_{o1}, Y_{o1}, Z_{o1}, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1$)
- Šest prvků vnější orientace pro pravý snímek ($X_{o2}, Y_{o2}, Z_{o2}, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2$)
- Osmnáct souřadnic X, Y, Z pro šest vázacích bodů

Celkový počet neznámých je tedy 30. Celková kvalita svazkového vyrovnání bloku metodou nejmenších čtverců je funkcí redundance (nadbytečnosti). Ta je rozdílem počtu známých parametrů vzhledem k počtu neznámých parametrů v soustavě rovnic. V našem případě tedy 36 (známých) minus 30 (neznámých) dává 6 nadbytečných rovnic. Tento počet se označuje jako **stupně volnosti**.

Metoda nejmenších čtverců (MNČ) je v rámci svazkového vyrovnání využita k následujícím výpočtům:

- odhad a vyrovnání prvků vnější orientace
- odhad souřadnic X, Y vázacích bodů
- odhad a vyrovnání prvků vnitřní orientace
- minimalizace a distribuce (vyrovnání) chyb v souřadnicích GCP ve svazku

Přitom celková nepřesnost vyrovnání bloku může souviset s nepřesnostmi souřadnic vstupních GCP, ale i měřených souřadnic vlíčovacích i vázacích bodů, kalibračními konstantami kamery, systematickými chybami apod.

MNČ je iterační výpočet, který probíhá tak dlouho, než je chyba reziduí minimální. Přitom rezidua jsou rozdílem mezi hodnotami vstupními (změřenými) a hodnotami vypočtenými z modelu (ze soustavy kolineárních rovnic).

Na počátku do výpočtu vstupují inicializační hodnoty prvků vnější orientace, které získáme z měření GPS a IMS. MNČ jsou zjištěny korekce, o které se v další iteraci hodnoty opraví. Tento iterační výpočet zpřesňování hodnot prvků vnější orientace probíhá tak dlouho, dokud korekce neznámých parametrů nejsou menší než uživatelem zadaná prahová hodnota (běžně označovaná jako **hodnota konvergence**).

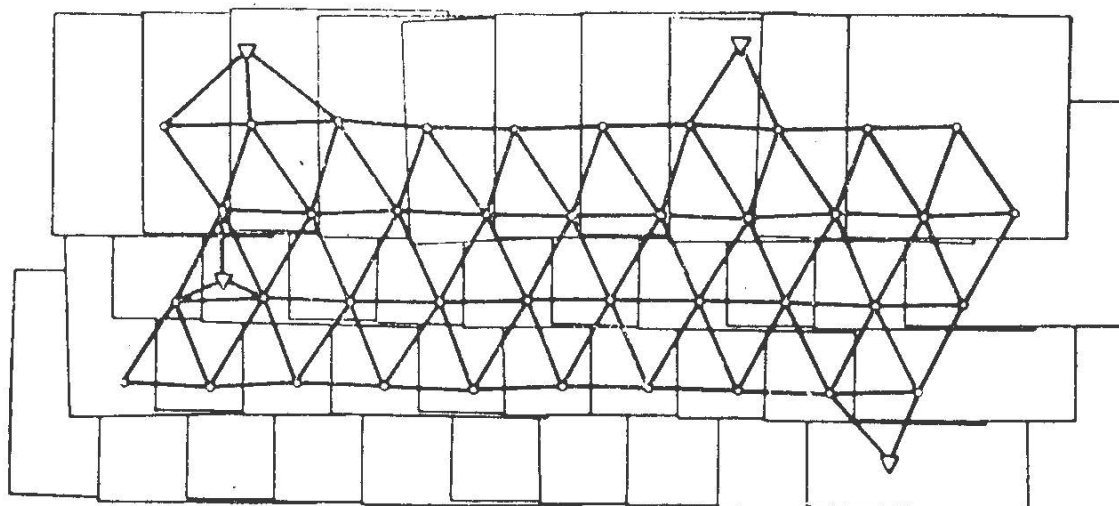
Výsledkem svazkového vyrovnání bloku jsou:

- konečné hodnoty parametrů vnitřní orientace pro každý snímek v bloku a jejich přesnost
- konečné hodnoty parametrů vnější orientace pro každý snímek v bloku a jejich přesnost
- souřadnice X, Y, Z vázacích bodů a jejich přesnost
- vyrovnané hodnoty souřadnic GCP a jejich reziduální hodnoty
- reziduální hodnoty snímkových souřadnic

Hodnoty poskytované metodou svazkového vyrovnání pak slouží k řešení těchto úkolů:

- tvorba stereomodelu
- fotogrammetrický sběr dat (feature collection)
- přesné určování 3D polohy bodů
- extrakce DEM
- ortorektifikace

Postupů aerotriangulace se používá také jako metody tzv. **připojování snímků**. Snímky mají standardní překryt 60 % a po provedení orientace prvního modelu vzniká každý další model přímým připojením snímku k předcházejícímu modelu. Postupně tak dostáváme model celého pásu. Volí se tzv. spojovací body v oblasti trojnásobného překryvu (nahore, dole a uprostřed). Krajní body tvoří trojúhelníkový řetězec a vytváří se trojúhelníková síť (obr. 8.14).



Obr. 8.14 Aerotriangulační síť

V procesu aerotriangulace se využívá metod označovaných jako self-calibration k odstranění systematických chyb, proces dále obsahuje algoritmy k detekci hrubých (řádových) chyb – tzv. **robustní algoritmy**. Jsou založeny na systému vah při MNČ. Hodnoty souřadnic GCP by měly mít v procesu vyrovnání větší přesnost a tudíž větší váhu než vázací body. Možnost odhalit hrubé chyby také přímo souvisí s počtem vázacích bodů. Současné postupy umožňují jejich automatické vyhledávání (viz dále).

Metody snímkové triangulace dále umožňují **zahustit** přímo fotogrammetrickou metodou **bodové pole** s dostatečnou přesností, tak aby bylo nové body možné použít jako vlíčovací. Nutnost pracného geodetického zaměřování těchto bodů klesá na minimum. Postupy jsou analogové, grafické i mechanické. Analytické určování souřadnic vlíčovacích bodů dovoluje řešit úlohy, které jich potřebují velké množství a dříve byly obtížně řešitelné (např. tvorba modelu terénu). Snímkové aerotriangulace tedy s využitím vlíčovacích bodů základního bodového pole počítají souřadnice dalších bodů a vytvářejí tak kostru podrobného bodového pole.

Pro snímkovou triangulaci se někdy využívá snímků ze speciálního náletu zpracovávaného území, pořizovaných z větší výšky z důvodů redukce počtu snímků. Např. pro tvorbu topografických map ZM 1: 10 000 bylo zhušťování bodového pole prováděno se snímky v měřítku 1 : 25 000.

Aerotriangulace se využívá se využívá především pro tyto úkoly:

- blokové vyrovnání snímků
- zahuštění bodového pole vlíčovacích bodů pro podrobné vyhodnocení
- pro digitální ortofoto
- pro extrakci DTM

Vyhodnocovací přístroje

Přístroje pro přesná vyhodnocování se podle stupně obnovy prvků vnější orientace (PVO) dělí do těchto 4 skupin (Pavelka, 1998):

1. Stroje s obnovou PVO – analogové analytické a semianalytické
2. Stroje s přibližným řešením – stereotop, stereokord
3. Stroje bez obnovy PVO – stereoskopy, interpretoskop, stereopret
4. Komparátory – mono a stereo

Analogové přístroje

Používaly se většinou do konce 80. let. Byly velmi přesné a kvalitní, často v závěru propojovány s počítači. Veškeré postupy se dějí na principu analogie modelu se skutečným stavem. Nevýhodou je nutnost odborného zaškolení, nutnost provádění mechanické údržby. Výstupem je jediný originál. Později vybaveny registrátory souřadnic. Dosahovaná přesnost se pohybuje u snímkových souřadnic (střední chyba) do 10 mikrometrů, střední chyby v určení výšek do jednoho promile z výšky letu (h).

Dělí se na stroje

- **s optickou projekcí** – do projektoru se založí snímky a projektory se nastaví do takové polohy, jako byla komora při snímkování – orientace snímků. Vytvoří se skutečný stereoskopický model, který se proměňuje skutečnou měřickou značkou. Projektorů je v rámu zavěšeno několik – lze tak rekonstruovat celý pás snímků. Hlavní představitel – projekční multiplex. Tzv. srereoplanigraf vytváří neskutečný, zdánlivý model
- **s mechanickou projekcí** – modernější – nemají objektivy, ale kardanové závěsy pro řídicí tyče, které nahrazují promítací paprsky. Na horním konci tyče je měřická značka, spodní konec je na základovém vozíku. Umožňují vyhodnocovat snímky pořízené různými komorami (nemají objektiv). Nemají optické části choulostivé na poškození, ale naopak se např. musejí uchovávat v prostředí se stálou teplotou – tepelná roztažnost kovů (laboratorní).

Příklady analogových přístrojů: Topokart (Zeiss) používá rovinná pravítka na místo tyčí, má nastavitelnou konstantu komory. Autograf A-7 a A-10 (Wild) se vyznačuje vysokou přesností, možností provádět aerotriangulaci. Má nastavitelné f v rozsahu od 86 do 310 mm. Lze k němu připojit mechanický kreslicí stůl a registrační zařízení. Autograf A-10 obsahuje zřízení na odstranění vlivů zakřivení země a atmosférické refrakce, umožňuje zpracování snímků o rozměru 23 x 23 cm. Výškopis se na analogových přístrojích vyhodnocuje metodou určování uzlových bodů mřížky a výškovým určením význačných bodů s následnou interpolací.

Analytické stroje

Analytické metody fotogrammetrie byly známy po dlouhou dobu, z důvodů početní náročnosti nebyly dlouho implementovány. Až po uvedení počítačů dostatečně rychlých s dostatečnou pamětí. Měření snímkových souřadnic na mono či stereokomparátorech je absolutně nejpřesnější. Máme-li snímkové souřadnice jednotlivých bodů, lze je početně opravovat o nejrůznější vlivy. Výstupy lze uchovávat v digitální podobě. Princip analytického vyhodnocovacího přístroje navrhl Helava v r.1957. Základem je stereokomparátor s motorickým pohybem snímků založených v nosičích, digitální odečítání polohy ovládacích prvků a výkonný počítač s obslužným programem.

Postup vyhodnocování: Založí se snímky a dostředí na značky. Do počítače se vloží prvky vnitřní orientace, soubor s měřeným rámovými značkami, zavedou se případné eliminace chyb (např. radiální distorze). Dále se zadá soubor se souřadnicemi vlíčovacích bodů. Ručními koly se nastaví levý obrazový bod. Poté se nastaví totožný bod i na pravém snímku tak, že měřická značka je viděna stereoskopicky jako jeden bod. V tomto okamžiku jsou známy snímkové souřadnice pro určovaný bod na obou snímcích. Tento postup se aplikuje na rámové značky a takto se provede vnitřní orientace. Dále proběhne vnější orientace – jako komplexní či ve dvou krocích (relativní a absolutní) s využitím vlíčovacích bodů. Dále se zapojí i nožní kotouč, kterým se odečítají souřadnice bodů x , y , z a okamžitě se transformují na geodetické souřadnice X , Y , Z .

Přesnost je srovnatelná s precizními komparátory. Snímkové souřadnice jsou odečítány s přesností 0,5-1 mikrometr, skutečná přesnost se pohybuje v rozmezí 1-4 mikrometry. Přesnost ve výškách se udává 0,03 promile h (m).

Pro podrobné vyhodnocení je dodávána celá sada podprogramů (kartografické značky, moduly pro DTM, automatická tvorba vrstevnic plynulou kresbou, moduly pro analytickou

aerotriangulaci., tvorbu profilů, měření bodů v pravidelné mřížce (gridu) pro DTM, počítačem se určí krok gridu a automaticky se najíždí na vrcholy gridu, zpracovatel pouze výškově dorovná měřickou značku, lze ukládat souřadnice lomových bodů v časovém či polohovém intervalu. Vylepšení umožňují promítnout vektorovou mapu do obrazu – vyhodnocování změn. Analytické přístroje komunikují s plotrem, na kterém se vykresluje originál – a to on line či off line.

První analytické plottery vznikly v polovině 70. let: PLANICOMP (Opton Oberkochen) – digitální mapování, analytická aerotriangulace, DTM. Speciální P kurzor, tablet, Spolupracuje s ARC/INFO, Microstation. Dalšími příklady analytických plotterů jsou SD 3000, SD 2000 (Leica, dnes LH Systems) či DICOMAT (Zeiss). Přesnost vyhodnocení se pohybuje v řádu jednotek mikrometrů.



Obr. 8.15 Příklad analogového přístroje s mechanickou projekcí



Obr.8.16 Příklad analytického stereoplottteru