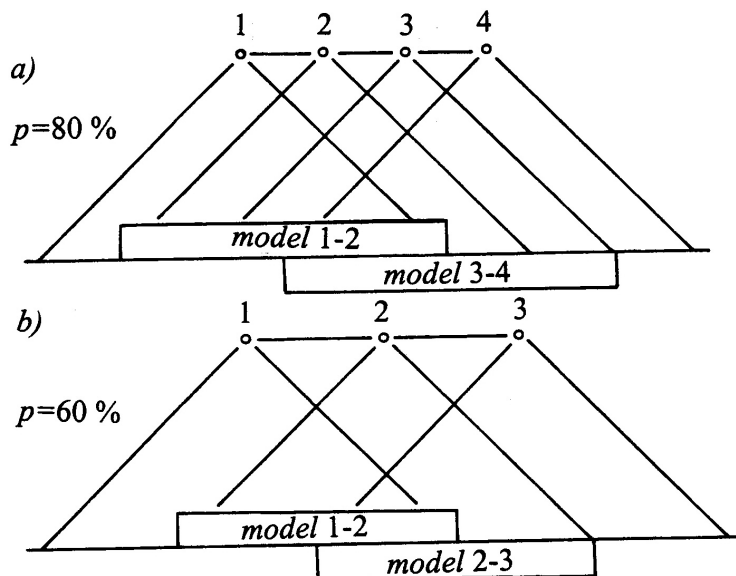


13. AEROTRIANGULÁCIA

Pod pojmom aerotriangulácia rozumieme zhust'ovanie bodového poľa s využitím leteckých fotogrametrických snímok. K prvému už absolútne orientovanému optickému modelu priradíme orientáciou ďalšiu snímku, a tak postupne zostavíme rad optických modelov celého snímkového pásu (obr. 13.1).



Obr. 13.1. Princíp aerotriangulácie

V takomto celkovom modeli môžeme na vhodných miestach určiť potrebný počet nových vličovacích bodov. Pri priestorovej aerotriangulácii súčasne určujeme všetky tri priestorové súradnice nových bodov.

Aerotrianguláciu aplikujeme:

- na priestorových vyhodnocovacích prístrojoch univerzálneho typu; vtedy je to tzv. *prístrojová (analogová) aerotriangulácia*,
- na podklade analytického vyjadrenia vzťahov medzi snímkovými a modelovými súradnicami; vtedy je to tzv. *analytická aerotriangulácia*,
- pri použití digitálnych snímok aplikujeme digitálnu aerotrianguláciu.

Pre zostavenie celkového modelu snímkového pásu z čiastkových modelov môžeme použiť buď metódu nezávislých snímkových dvojíc, alebo metódu prirad'ovania snímok.

Pri metóde nezávislých snímkových dvojíc (obr. 13.1a) zostavujeme celkový model z jednotlivých nezávislých modelov vzniknutých z dvojíc snímok 1 a 2, 2 a 3, 3 a 4 atď. Spojenie medzi modelmi zaisťujú spoločné body v pásme spoločného prekrytu modelov. Aby sa modely prekrývali asi o 60 % musia mať snímky prekryt asi 80 %.

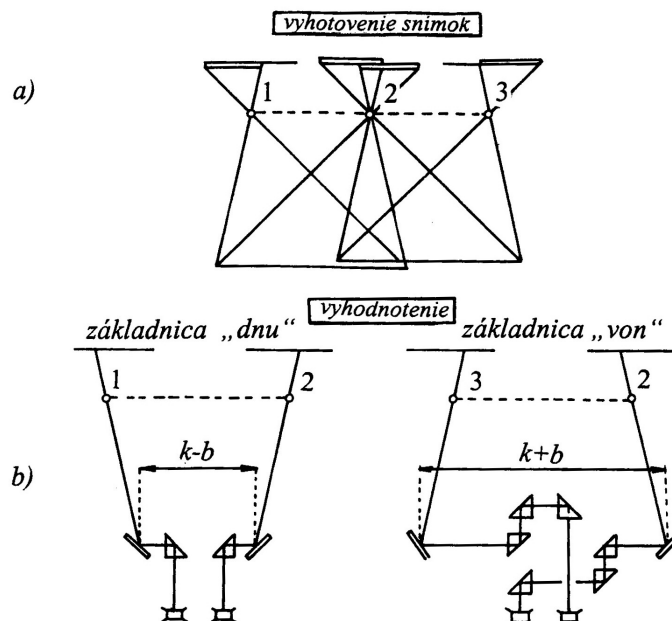
Všeobecne sa dáva prednosť postupnému prirad'ovaniu snímok (obr. 13.1b), keď pri 60 %-nom prekryte snímok každý čiastkový model vznikne bezprostredným priradením snímky na predchádzajúci model.

13.1 Prístrojová aerotriangulácia

Pre prístrojovú aerotrianguláciu sú potrebné projekčné analogové priestorové vyhodnocovacie prístroje. Celkový model je zostavený z čiastkových modelov. Vytvára sa postupným prirad'ovaním snímok k predchádzajúcej snímke poslednej dvojice snímok. Základnice nastavujeme v príslušnom zmenšení. Základnice majú potom takú polohu v priestore, akú mali spojnice expozičných miest

(vzdušné základnice) pri vyhotovení snímky. Prístrojovú aerotrianguláciu aplikujeme na univerzálnych priestorových vyhodnocovacích prístrojoch, akými sú napr. stereometrograf alebo Wildov autograf A7. Nakoľko ide o dvojprojektorové prístroje, musia byť upravené na tzv. zmenu pozície snímky.

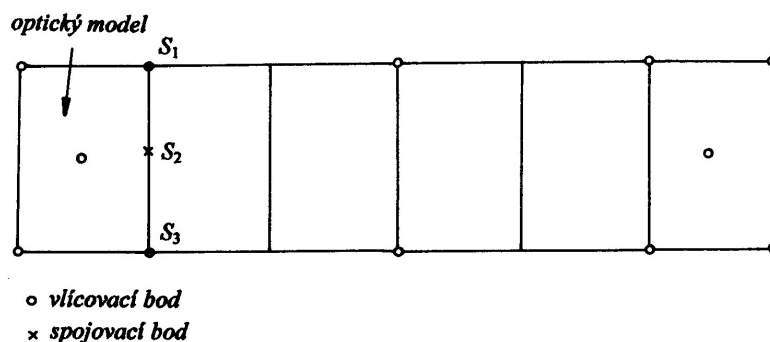
Po orientácii prvého modelu (obr. 13.2a) je potrebné snímku 1, ktorá sa nachádza napr. v ľavom projektore, nahradiť snímkom 3. Aby nevznikol pseudoskopický efekt, je potrebné navzájom vymeniť chod svetelných lúčov prichádzajúcich do ľavého a pravého oka pozorovateľa. Pre zachovanie geometrických pomerov je potrebné okrem toho základnicovú zložku bx nastaviť nie smerom "dnu", ale smerom "von", t.j. v opačnom smere od nulového bodu. Pri obidvoch týchto opatreniach získame zo snímok 2 a 3 stranovo a hĺbkovo správny čiastkový model.



Obr. 13.2. Aerotriangulácia na dvojprojektorovom vyhodnocovacom prístroji

Prístrojovú aerotrianguláciu môžeme vyhodnotiť polografickým alebo numerickým spôsobom. Pri polografickom spôsobe aerotriangulácie, polohu nových bodov priamo kartírujeme a ich výšky čítame na výškovej stupnici. Pri numerickom spôsobe aerotriangulácie priestorovú polohu triangulovaných bodov vyjadríme čítaním (registrovaním) prístrojových súradníc.

V rámci prípravných prác sa prehliadnu a zhodnotia jednotlivé stereogramy a zvolia sa spojovacie vĺčovacie body. Spojovacie body sú body v spoločnom prekryte susedných optických modelov. Ďalej sa vykoná montáž snímkového pásu z kontaktných kópií, pomocou ktorého získame obraz o priebehu prípadného vybočenia snímkového pásu. Na podklade montáže, môžeme dostatočne presne nastaviť pootočeniu prvej snímky tak, aby sa neprekročil existujúci rozsah základnicovej zložky by vo vyhodnocovacom prístroji.



Obr. 13.3. Rozloženie vĺčovacích bodov pri priestorovej aerotriangulácii

Sled prác pri projektorovej aerotriangulácii:

1. Vzájomná orientácia prvého modelu (snímky 1 a 2).
2. Absolútna orientácia prvého bodu podľa daných vlícovacích bodov.
3. Priradenie 3. snímky k 2. snímke zmenou pozície snímky (zmenou chodu svetelných lúčov).
4. Prispôsobenie mierky druhého čiastkového modelu opravou bx na podklade porovnania modelových výšok terénnych bodov ležiacich v pásme prekrytu modelov.
5. Pokračovanie v úkonoch uvedených v bodoch 3. a 4. pri všetkých ostatných snímkach.
6. Úprava mierky celkového modelu na podklade kontroly pri daných vlícovacích bodoch v poslednom modeli (obr. 13.3). Mierka sa upraví počtársky.

Mierka sa účelne preniesie pomocou troch prenášacích bodov S_1 , S_2 , S_3 , ležiacich na okraji optického modelu. Pri optimálnom nastavení základnice suma štvorcov odchýlok S_1 , S_2 , a S_3 je minimálna. Súradnice totožných bodov v prvom a druhom modeli (aj v ďalších modeloch) zapíšeme a napokon jednotlivé modely spojíme v súvislý celok.

Zistené odchýlky v polohe a výškach na vlícovacích bodoch na poslednom optickom modeli vyrovnáme počtársky. Pri voľbe metódy vyrovnania zohľadníme odchýlky na kontrolných vlícovacích bodoch v strede snímkového pásu.

Výsledkom aerotriangulácie je zoznam prístrojových súradníc nových bodov doplnený prípadne polohopisným plánom bodového poľa so zoznamom výšok.

13.2 Analytická aerotriangulácia

Výpočtová technika podnietila rozvoj metód analytickej aerotriangulácie.

Vstupné hodnoty analytickej aerotriangulácie sú snímkové súradnice. Merajú sa na precíznych monokomparátoroch alebo stereokomparátoroch s presnosťou ± 1 až $2 \mu\text{m}$.

Po oprave systematických snímkových chýb prichádzajú do úvahy v analytickej aerotriangulácii len nepravidelné zvyškové chyby snímkového materiálu a chyby v meraní snímkových súradníc.

Skúsenosti z využitia analytickej aerotriangulácie potvrdzujú jej vysokú efektívnosť pri zhusťovaní v jednotlivých pásoch, ale najmä v blokoch zložených z viacerých pásov, pričom stačí menší počet a všeobecnejšie rozloženie daných bodov ako pri prístrojovej aerotriangulácii.

Metódy analytickej aerotriangulácie sa využívajú v prevádzkových podmienkach pre účely zhusťovania bodového poľa pre mapovanie vo veľkých mierkach.

Metódy analytickej aerotriangulácie delíme na:

1. Etapové riešenie.
2. Komplexné riešenie.

1. *Etapové riešenie* je z hľadiska pracovného postupu podobné prístrojovej aerotriangulácii. Jednotlivé etapy riešenia sú:

- a) vzájomná orientácia snímok a výpočet základnej jednotky vo zvolenom nezávislom súradnicovom systéme. Základnou jednotkou môže byť snímková dvojica, dvojmodel a pod.
- b) spojenie základných jednotiek do spoločného súradnicového systému.
- c) vyrovnanie pásu alebo spojeného bloku vzhľadom na dané geodetické body.

Z hľadiska matematického modelu riešenia sa metódy etapového riešenia rozdeľujú podľa prístupu k riešeniu vzájomnej a absolútnej orientácie (napr. podmienky komplanárnosti, kolíneárnosti,

alebo

pre prenášanie mierky), alebo podľa spôsobov vyrovnania pásu alebo bloku (iteračný spôsob vyrovnania s určitým počtom rovníc, priame riešenia a pod.).

Postupy etapového riešenia:

a) aeropolygónom sa analyticky riešia jednotlivé úkony, ktoré zodpovedajú úkonom pri prístrojovej aerotriangulácii. Postup začína výpočtom piatich orientačných prvkov vzájomnej orientácie, pričom sa vo všeobecnosti používa podmienka komplanárnosti, podľa ktorej zodpovedajúce určovacie lúče musia ležať v jednej rovine s projekčnými centrami. Ďalším krokom je mierkové priradenie modelu bez porušenia vzájomnej orientácie k predchádzajúcemu modelu.

Pri druhom pracovnom postupe sa súčasne vypočíta všetkých šesť orientačných prvkov snímky. V prípade nadbytočných meraných prvkov sa meranie vyrovná. Pre vĺčovacie lúče spojovacích bodov, ktoré sú spoločné s predchádzajúcim modelom, sa použije podmienka komplanárnosti so zodpovedajúcim lúčom z prvej snímky na vyrovnanie všetkých orientačných prvkov.

2. *Komplexné riešenie* je založené na súčasnom vyrovnaní potrebných parametrov všetkých snímok v pásu alebo bloku, a to priamo alebo s použitím iteračnej metódy. Táto metóda zaručuje najvyššiu presnosť výsledkov. Hlavnou požiadavkou komplexného riešenia je určiť približnú polohu projekčných centier a predbežné hodnoty orientačných prvkov. Nutnosť poznať uvedené približné hodnoty predpokladá použitie vhodnej metódy na ich získanie, pričom sa používa podmienka kolineárnosti.

Takmer všetky metódy analytickej aerotriangulácie majú nadbytočný počet meraných hodnôt, ktorý dovoľuje vyrovnanie podľa metódy najmenších štvorcov. Určenie prvkov vzájomnej, vonkajšej alebo absolútnej orientácie vždy vychádza zo sústavy nelineárnych rovníc. Preto sa využíva aproximatívne (iteračné) riešenie rovníc linearizovaných rozvojom do Taylorovho radu a každou iteráciou sa spresňujú vstupné údaje riešenia, a tým aj hodnoty neznámych prvkov.

Princíp aerotriangulácie je v postupnom priradovaní modelov prenášaním mierky a priestorovej orientácie prvého modelu na ďalšie modely spojené do pásu. Jednotlivé pracovné úkony sú zaťažované chybami, ktoré majú prevažne systematický a nepravidelný charakter. V priebehu aerotriangulácie sa prejavujú pri jednotlivých pracovných úkonoch vplyvy nasledujúcich zdrojov chýb.

- a) v každej snímke - vplyv chýb vnútornej orientácie,
- b) v prvom modeli pásu - vplyv chýb vzájomnej a absolútnej orientácie,
- c) v druhom a ďalších modeloch - chyby z priradenia modelu vzájomnou orientáciou a z prenášania mierky,
- d) vo všetkých modeloch - merané hodnoty sú zaťažené chybou z nastavenia meracej značky.

Obsah meračskej snímky je zaťažený systematickými chybami a nepravidelnými chybami fyzikálneho charakteru. Snímkové chyby spôsobujú:

- chyby emulzného podkladu,
- skreslenie objektívu,
- vplyv zakrivenia Zeme,
- účinok refrakcie.

Presnosť výsledkov aerotriangulácie ovplyvňujú:

- vyhodnocovateľ (osobná chyba, chyba z nastavovania meracej značky)
- justážny stav prístroja,
- kvalita a kartografické zobrazenie daného bodového poľa.

13.2.1 Etapové riešenie analytickej aerotriangulácie

Výsledkom metód analytickej aerotriangulácie sú súradnice určovaných bodov v geodetickom súradnicovom systéme. Počítajú sa z odmeraných snímkových súradníc a súradníc daných (vľicovacích) bodov. Postup riešenia pre metódu etapového riešenia vyjadruje schéma

$$\boxed{P'(x'_m, y'_m, c_k)} \xrightarrow{RO} \boxed{P'(x', y', z')} \xrightarrow{k} \boxed{P(x, y, z)} \xrightarrow{AO} \boxed{P(x_G, y_G, z_G)} \quad \text{IT} \quad (13.1)$$

kde x'_m, y'_m sú merané snímkové súradnice,

RO je relatívna orientácia snímok,

x', y', z' sú pretvorené snímkové súradnice vo zvolenom systéme,

k je mierkový koeficient,

x, y, z sú modelové súradnice alebo priestorové súradnice,

IT iteračné spresňovanie jednotlivých parametrov,

AO absolútna orientácia modelového pásu,

x_G, y_G, z_G sú výsledné súradnice v geodetickom súradnicovom systéme.

Postup etapového riešenia prakticky zodpovedá postupu pri prístrojovej aerotriangulácii. Riešenie má časť na získavanie dát a spracovanie dát.

Do časti získavania dát patrí:

- príprava snímkového materiálu,
- stereoskopické označenie spojovacích, prípadne určovaných bodov,
- meranie snímkových súradníc x', y' a x'', y'' na monokomparátore alebo x', y', p a q na stereokomparátore.

Spracovanie dát zahŕňa opravy snímkových súradníc, predbežné riešenie v páse a definitívne v bloku.

1. Opravy vstupných hodnôt meraných snímkových súradníc sú:

- a) oprava z kalibrácie systematických chýb monokomparátora,
- b) oprava zo zrážky filmu,
- c) oprava zo skreslenia objektívu,
- d) oprava z atmosférickej refrakcie a zo zakrivenia Zeme.

2. Predbežné riešenie v páse:

a) orientácia troch snímok alebo dvojmodelov, čím sa určuje poloha všetkých dôležitých bodov v priestorovom súradnicovom systéme približne v snímkovej mierke.

b) zostavenie modelov do pásu a vyrovnanie pásu,

c) oprava súradníc pásu zo zakrivenia Zeme,

d) transformácia pásu do geodetického súradnicového systému a vyrovnanie s využitím metódy najmenších štvorcov. Výsledkom sú predbežné súradnice všetkých bodov.

3. Definitívne riešenie v bloku:

a) geocentrická transformácia súradníc s vyrovnaním a s uvažovaním zakrivenia Zeme. Vyrovnané geocentrické súradnice sa transformujú späť do geodetického súradnicového systému,

b) vyrovnanie v bloku. Súčasné riešenie absolútnej orientácie, t. j. tri translácie dx_0 , dy_0 , a dz_0 a tri rotácie $d\varphi$, $d\omega$, a $d\kappa$ všetkých snímok. Opravy predbežných súradníc každého bodu.

Vyrovnanie v bloku zahŕňa tri časti:

a) priestorové pretínanie nazad, čím sa prispôsobia snímkové údaje každej snímky zodpovedajúcim predbežným geodetickým súradniciam na určenie počiatočných hodnôt prvkov vnútornej a vonkajšej orientácie snímky,

b) absolútna orientácia bloku, t. j. všetkých snímok spolu s výpočtom výsledných geodetických súradníc určovaných vlíčovacích bodov, ako aj projekčných centier,

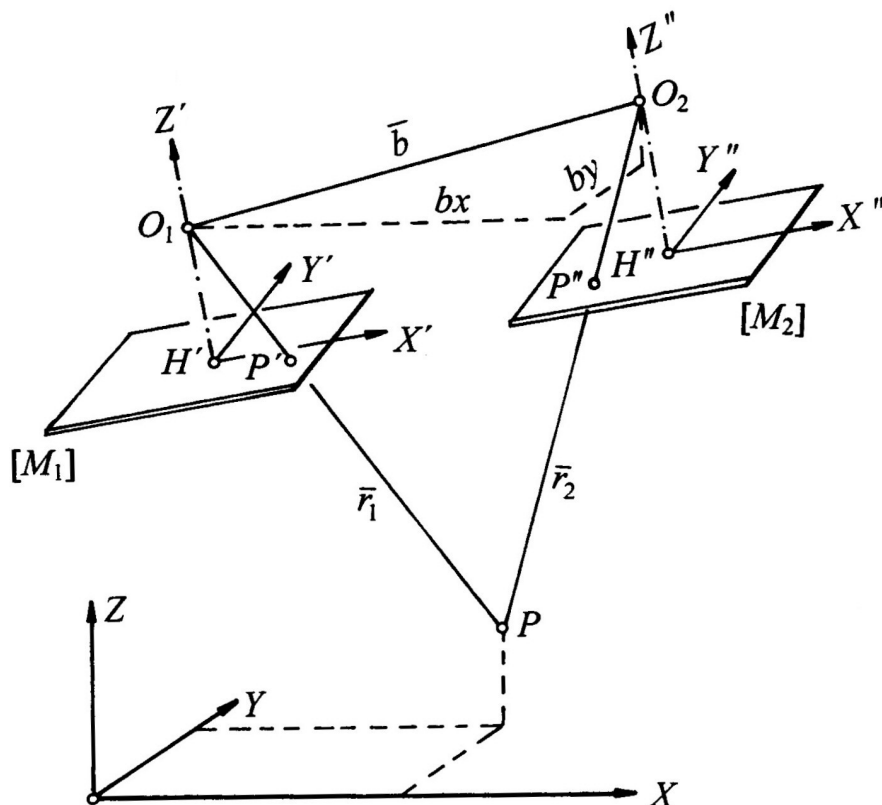
c) určenie podrobných bodov nerovnomerne rozložených na snímkach.

V súčasnosti existuje mnoho variánt metód postupného riešenia od rôznych autorov, ako sú napr. Schut, Tomsa a iní.

Jeden z najdôležitejších úkonov všetkých uvedených metód je spôsob vytvorenia jednotlivých modelov zo snímkových dvojíc. Je to úkon, ktorý nahrádza vzájomnú orientáciu pri prístrojovej aerotriangulácii. Klasifikácia jednotlivých metód vychádza z matematickej definície nasledujúcich podmienok:

1. zodpovedajúce určovacie lúče musia byť komplanárne, t.j. musia ležať v rovine preloženej základnicou a príslušným bodom,
2. vertikálne paralaxy pretvorených snímok musia byť rovné nule,
3. modelové vertikálne paralaxy musia byť rovné nule,
4. predmetové uhly medzi určovacími lúčmi musia byť rovné zodpovedajúcim uhlom v obrazovom priestore.

Matematicky sú uvedené podmienky vyjadrené nelineárnymi funkciami príslušných orientačných prvkov a po ich linearizácii rozvojom do Taylorovho radu pri zanedbaní členov druhého a vyšších rádov dostaneme sústavu lineárnych rovníc, ktoré sa riešia iteračným spôsobom.



Obr. 13.4. Podmienka komplanárnosti

13.2.2 Schutovo riešenie

Vzájomná orientácia snímok vychádza z podmienky komplanárnosti, podľa ktorej základnica a zodpovedajúca dvojica určovacích lúčov musia ležať v jednej rovine (obr. 13.4). Podmienkou vzájomnej orientácie je odstrániť vertikálne paralaxy. Potom sa vektory určujúcich lúčov \mathbf{r}_1 a \mathbf{r}_2 pretínajú v bode P a spolu so základnicou \mathbf{b} spĺňajú podmienku komplanárnosti, t.j. zložený vektorový súčin je rovný nule:

$$\mathbf{b} \mathbf{r}_1 \mathbf{r}_2 = 0, \quad (13.2)$$

$$\text{pričom vektor } \mathbf{b} = \begin{pmatrix} bx \\ by \\ bz \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{02} - x_{01} \\ y_{02} - y_{01} \\ z_{02} - z_{01} \end{pmatrix}.$$

Rovnica (13.2) v tvare determinantu je

$$\begin{vmatrix} bx & by & bz \\ x' & y' & z' \\ x'' & y'' & z'' \end{vmatrix} = 0. \quad (13.3)$$

Vzťah (13.3) vyjadruje súčin súradnicových zložiek vektorov základnice a určovacích lúčov. Z hľadiska vzájomnej orientácie ide vždy o priradenie pravého zväzku určovacích lúčov k pevnému ľavému zväzku. Neznámymi prvkami vzájomnej orientácie sú základnicové zložky by a bz z prvého riadku determinantu a rotácie ω , φ , κ skryté v pretvorených súradniciach x'' , y'' a z'' tretieho riadku. Hodnota základnicovej zložky sa zvolí približne vopred.

Pretvorenie súradníc pravej snímky je vyjadrené vzťahom

$$\begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}, \quad (13.4)$$

pričom \mathbf{A} je rotačná matica vytvorená 9 smerovými kosínusmi (tab. 11.1).

Linearizáciou rovnice (13.3) dostaneme rovnicu pre určenie prvkov vzájomnej orientácie:

$$\begin{vmatrix} bx & by & bz \\ x' & y' & z' \\ -y'' & x'' & 0 \end{vmatrix} d\kappa + \begin{vmatrix} bx & by & bz \\ x' & y' & z' \\ z'' & 0 & -x'' \end{vmatrix} d\varphi + \begin{vmatrix} bx & by & bz \\ x' & y' & z' \\ 0 & -z'' & y'' \end{vmatrix} d\omega + \begin{vmatrix} z' & x' \\ z'' & x'' \end{vmatrix} dby + \begin{vmatrix} x' & y' \\ x'' & y'' \end{vmatrix} dbz + \begin{vmatrix} bx & by & bz \\ x' & y' & z' \\ x'' & y'' & z'' \end{vmatrix} = 0. \quad (13.5)$$

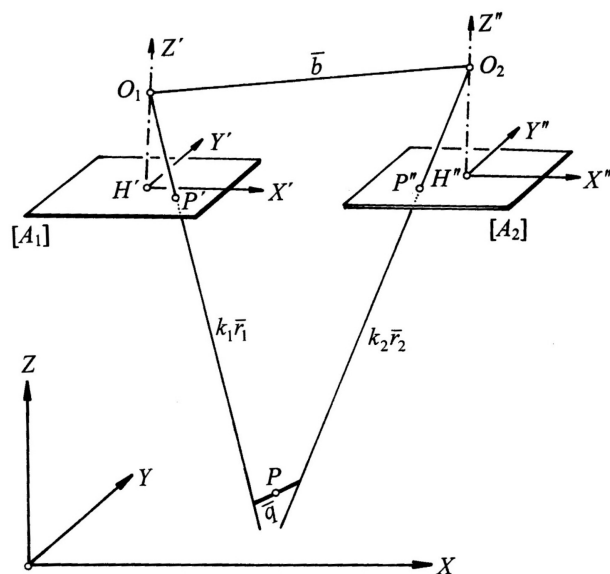
Pri opakovanom výpočte spresnených hodnôt $d\varphi$, $d\omega$, $d\kappa$ je potrebné ich zlúčiť s prvkami predchádzajúcej iterácie maticovým súčinom

$$\mathbf{A}_{nová} = \mathbf{A}_{oprav} \cdot \mathbf{A}_{stará}. \quad (13.6)$$

V dôsledku zvyškových vertikálnych paralax nie je splnená podmienka pretínania sa piatich párov zodpovedajúcich určovacích lúčov podľa obr. 13.4. Preto je potrebné definovať bod P , ktorý ako náhrada za priesečník je v strede najkratšej vzdialenosti, v ktorej zodpovedajúce lúče prechádzajú najbližšie vedľa seba. Smer vektora \mathbf{q} (nie je dĺžka), ktorý je kolmý na obidva určujúce lúče, je daný vektorovým súčinom (obr. 13.5)

$$\mathbf{q} = \mathbf{r}_1 \mathbf{r}_2. \quad (13.7)$$

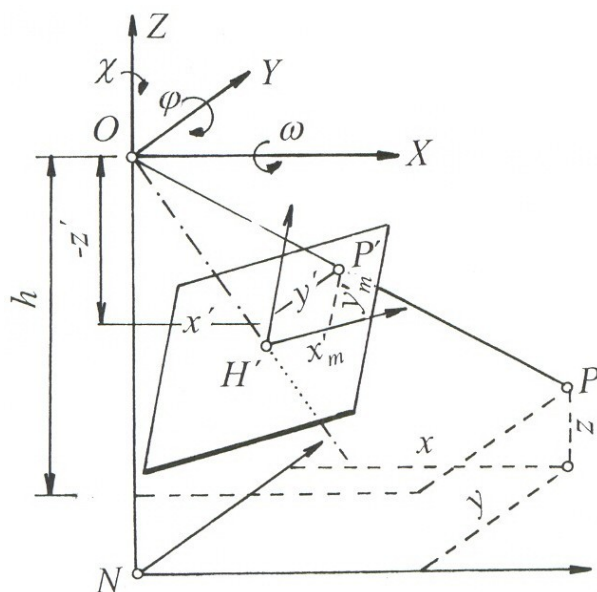
Mierkové pripojenie modelu môže sprostredkovať ľubovoľný bod v pásme trojnásobného pozdĺžneho prekrytu snímok a vyjadruje ho podmienka priesečníka troch určovacích lúčov 1-2 a 2-3 podľa vzťahu



Obr. 13.5 Podmienka pretínania zodpovedajúcich lúčov

$$\frac{\begin{vmatrix} bx & bz \\ x' & z' \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x' & z' \\ x''' & z''' \end{vmatrix}} = \frac{\begin{vmatrix} bx' & bz' \\ x''' & z''' \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x'' & z'' \\ x''' & z''' \end{vmatrix}}, \quad (13.8)$$

pričom x''' , z''' sú pretvorené súradnice z tretej snímky v súradnicovom systéme s osou Z vo vertikále (obr. 13.6).



Obr. 13.6 Súradnicové systémy

Modelové súradnice celého snímkového pásu sa transformujú do geodetického súradnicového systému priestorovou podobnostnou transformáciou

$$\begin{vmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{vmatrix} = k \mathbf{A} \begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{vmatrix}, \quad (13.9)$$

kde k je mierkový koeficient.

Základnou podmienkou, z ktorej komplexné riešenie vychádza, je podmienka kolineárnosti (obr. 13.7), ktorá znamená, že projekčné centrum, snímkový bod a zodpovedajúci bod na teréne leží na jednej priamke (kap. 11.1).

Schmidovo riešenie

Podmienku kolineárnosti vyjadrujú dva determinanty druhého stupňa

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{vmatrix} x_G - x_0 & z_G - z_0 \\ x' & z' \end{vmatrix} = 0 \dots \text{pre rovinu } X_G, Z_G \\ \begin{vmatrix} y_G - y_0 & z_G - z_0 \\ y' & z' \end{vmatrix} = 0 \dots \text{pre rovinu } Y_G, Z_G \end{array} \right\}. \quad (13.12)$$

Snímkové súradnice $x', y', z' = -c_k$ sa získajú pretvorením meraných snímkových súradníc x'_m, y'_m podľa vzťahu (11.26)

$$\begin{aligned} x' &= x'_H - c_k \frac{(x_G - x_0) \cos \alpha_x + (y_G - y_0) \cos \beta_x + (z_G - z_0) \cos \gamma_x}{(x_G - x_0) \cos \alpha_z + (y_G - y_0) \cos \beta_z + (z_G - z_0) \cos \gamma_z}, \\ y' &= y'_H - c_k \frac{(x_G - x_0) \cos \alpha_y + (y_G - y_0) \cos \beta_y + (z_G - z_0) \cos \gamma_y}{(x_G - x_0) \cos \alpha_z + (y_G - y_0) \cos \beta_z + (z_G - z_0) \cos \gamma_z}, \end{aligned} \quad (13.13)$$

ktorý zjednodušene zapíšeme

$$\begin{vmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{vmatrix} = \mathbf{A} \begin{vmatrix} x'_m \\ y'_m \\ -c_k \end{vmatrix}, \quad (13.14)$$

pričom matica \mathbf{A} má tvar podľa tab. 11.1.

Neznámymi v týchto rovniciach sú prvky vonkajšej orientácie snímkov $x_0, y_0, z_0, \varphi, \omega, \kappa$ a geodetické súradnice určovaných bodov x_G, y_G, z_G . Neznáme rotácie sú skryté v pretvorených snímkových súradniciach x', y' a $z' = -c_k$. Pred vlastným riešením rovníc je potrebné ich linearizovať, t. j. parciálne derivovať príslušnú funkciu podľa jednotlivých neznámych.

Linearizáciou podmienky kolineárnosti je možné odvodiť dva základné vzťahy, v ktorých neznámymi sú prvky vonkajšej aj vnútornej orientácie snímkov a geodetické súradnice bodov.

Podmienkové rovnice vychádzajú z linearizovaných základných vzťahov (13.13) a pre každý určovací lúč platia dve rovnice typu:

$$\begin{aligned} &a_1 v_{x'} + a_2 v_{y'} + a_3 v_x + a_4 v_y + a_5 v_z + a_6 dx + a_7 dy + a_8 dz + a_9 dx_0 + a_{10} dy_0 + \\ &+ a_{11} dz_0 + a_{12} d\kappa + a_{13} d\varphi + a_{14} d\omega + a_{15} dx'_H + a_{16} dy'_H + a_{17} dc_k + l_x = 0, \\ &b_1 v_{x'} + b_2 v_{y'} + b_3 v_x + b_4 v_y + b_5 v_z + b_6 dx + b_7 dy + b_8 dz + b_9 dx_0 + b_{10} dy_0 + \\ &+ b_{11} dz_0 + b_{12} d\kappa + b_{13} d\varphi + b_{14} d\omega + b_{15} dx'_H + b_{16} dy'_H + b_{17} dc_k + l_y = 0. \end{aligned} \quad (13.15)$$

Zostavením rovníc (13.15) pre jednotlivé určovacie lúče vznikne sústava pretvorených rovníc závislosti

$$\mathbf{A}\mathbf{v} + \mathbf{B}\mathbf{g} + \mathbf{l} = 0, \quad (13.16)$$

pričom \mathbf{v} je vektor opráv,

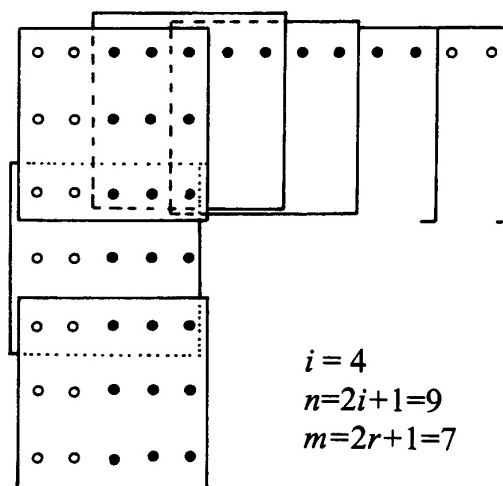
\mathbf{g} je vektor neznámych ($dx, dy, dz, d\varphi, d\omega, d\kappa$),

\mathbf{l} vektor absolútnych členov,

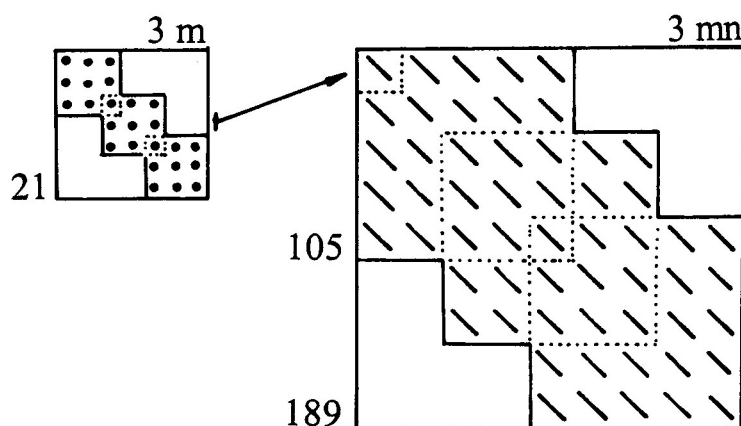
\mathbf{A}, \mathbf{B} sú matice príslušných koeficientov.

Normálne rovnice sa vytvoria s použitím pomocných korelát.

Zostavenie matice sústavy normálnych rovníc. Uvažujeme malý blok troch snímkových pásov po 5 snímkach s pozdĺžnym prekrytom $p = 60\%$ a s priečnym prekrytom $q = 30\%$. V každej snímke je vymeraných 15 bodov, čím vznikne pravidelná sieť 7 radov po 9 bodov (obr. 13.8).



Obr. 13.8. Príklad malého bloku



Obr. 13.9. Matica sústavy normálnych rovníc podľa bodových radov

Pri danej metóde riešenia sú neznámymi súradnice určovaných bodov. Základná matica je postupne vytvorená podľa vhodného poradia týchto bodov $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots (x_n, y_n, z_n)$. Počet bodov v jednom rade je $n = 2i + 1$, počet bodových radov $m = 2r + 1$,

pričom i je počet modelov,

r počet snímkových pásov.

Zostavenie matice sústavy normálnych rovníc podľa pozdĺžnych bodových radov.

Stavbu výslednej matice sústavy normálnych rovníc schématicky predstavuje obr. 13.9. Každá matica sústavy normálnych rovníc je vždy štvorcová a symetrická.

Z obr. 13.9 vyplývajú tri druhy korelácie, a to medzi súradnicami, bodmi a bodovými radmi. Prvé dva druhy korelácie vyjadruje submatice s rozmerom $3n = 27$ na obr. 13.9. Základné korelácie medzi súradnicami troch bodov zobrazených na dvoch snímkach vystihuje submatice typu 3/3 ohraničená na obr. 13.9 bodkami. Vyššie korelácie vystihujú vzájomnú väzbu bodov v bodových

radoch, napr. pre piaty bod prvého radu, zobrazený na troch snímkach je zrejma korelácia medzi 1. až 9. bodom v rade.

13.4 Digitálna aerotriangulácia

Digitálna automatická aerotriangulácia (DAA) využíva vzťahy analytickej aerotriangulácie v spojení s aplikáciou obrazovej korelácie a digitálneho obrazového priradovania. DAA je založená na komplexnom riešení analytickej aerotriangulácie (Schmidovo riešenie kap. 13.3) s vytvorením bloku snímok. Metóda využíva priamy prevod snímkových súradníc na geodetické súradnice s vyrovnaním zväzku lúčov MNŠ, ktoré vytvárajú celý blok snímok. Analytické riešenie predstavuje kolineárnu transformáciu snímkových súradníc do geodetického súradnicového systému. Postup DAA využíva automatické riešenie vzájomnej orientácie v bloku snímok, pri ktorom sa automaticky vytvárajú spojovacie body v pásmach dvojnásobného a trojnásobného pozdĺžneho prekrytu a v priečnom prekryte. Spojovacie body sa automaticky priradujú do susedných snímok. V riešení sa zavádzajú opravy z refrakcie, distorzie objektívu a zakrivenia Zeme.

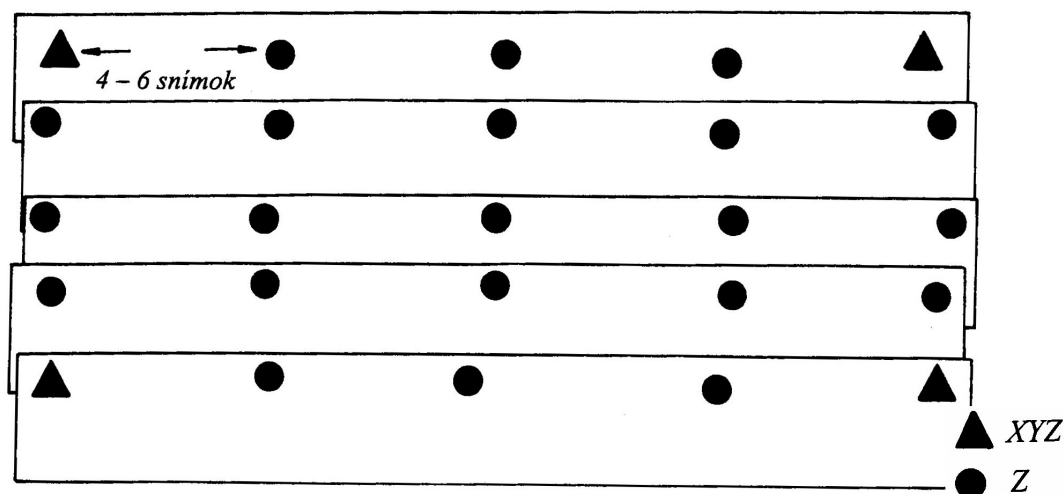
Vstupné dáta pre digitálnu aerotrianguláciu sú digitálne snímky (naskenované analógové snímky), súradnice vlícovacích bodov a prvky vonkajšej orientácie snímky. Digitálna aerotriangulácia je riešená programovo. Postupnosť programových krokov obsahuje:

- automatickú vnútornú orientáciu snímok na základe odmeraných a kalibráciou určených súradníc rámových značiek,
- automatický výber spojovacích bodov v bloku (pass/tie points), ktoré sú vhodné na aerotrianguláciu. Výber bodov využíva digitálnu obrazovú koreláciu. Počet a kvalitu spojovacích bodov je možné ovplyvniť. Signalizované vlícovacie body sa automaticky vyhľadávajú podľa definovaného vzoru, nesignalizované vlícovacie body identifikuje a zadáva fotogrameter,
- automatický prenos spojovacích bodov v rámci stereoskopického, trojnásobného pozdĺžneho prekrytu a priečného prekrytu snímok. Prenos je spojený s blokovým vyrovnaním spojovacích a vlícovacích bodov. Zvýšenie spoľahlivosti blokového vyrovnanie sa dá zaistiť zväčšením počtu spojovacích bodov,
- zhustenie vlícovacích bodov.

Program počas výpočtu podáva správu o kvalite a stave výpočtu. Automaticky analyzuje priebeh aerotriangulácie a odhaľuje výskyt hrubých chýb. Cieľom blokovej aerotriangulácie je vytvoriť ortofotomozaiku snímok a z nej odvodzovať digitálne ortofotomapy v sekčných čiarach mapových listov.

13.4.1 Vlícovacie body

Na absolútnu orientáciu bloku sú potrebné najmenej 4vlícovacie body. Ich optimálne rozmiestnenie je v rohoch bloku. Okrem vlícovacích bodov dôležitú úlohu majú kontrolné body na ktorých sa kontroluje výsledok aerotriangulácie. Kontrolné body sú v podstate vlícovacie body, ktoré nezapájame do vyrovnanie bloku. Do vyrovnanie je možné zapojiť vlícovacie body určené súradnicami y, x, z (3D), súradnicami y, x (2D) a body určené iba výškou (z). Do rohov bloku sa umiestňujú 3D vlícovacie body. Na okrajoch a po stranách pásov stačia vlícovacie body určené iba výškou (obr. 12.10). Vo vnútri bloku stačí 1 bod určený výškou na 4 až 6 snímok. Naznačený ideálny stav rozmiestnenie vlícovacích bodov je obtiažne docieľiť. Rozmiestnenie vlícovacích bodov, kvalita ich zobrazenia na snímkach v bloku a presnosť ich geodetického určenia významne ovplyvňuje kvalitu výsledku aerotriangulácie.

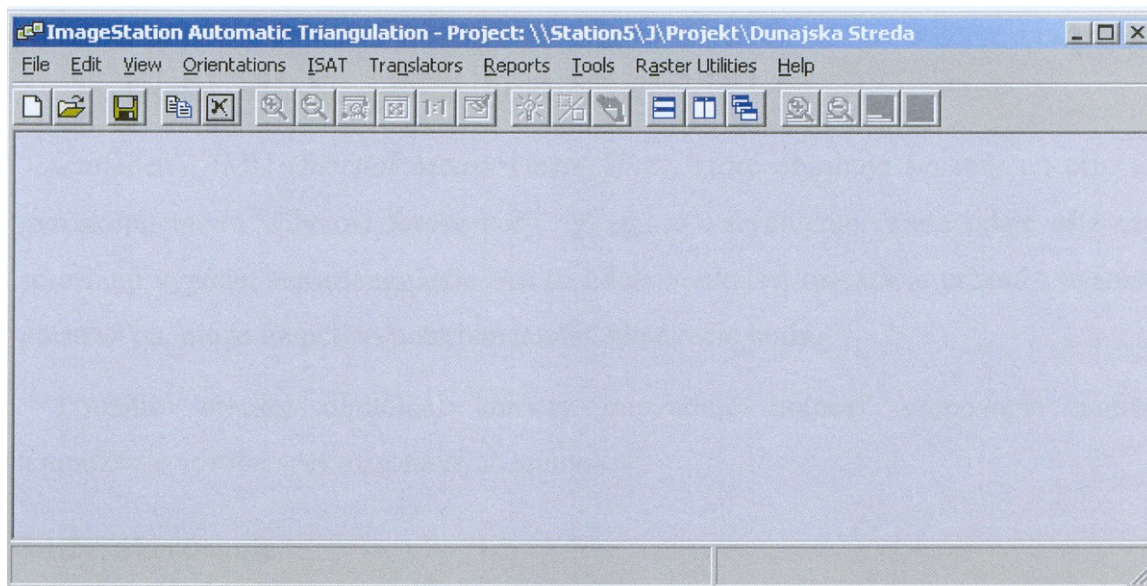


Obr. 12.10. Rozmiestnenie vlíčovacích bodov v bloku s 30% priečnym prekrytom.

Vlíčovacie body môžu byť prirodzene alebo umele signalizované (obr.9.10). Prirodzene signalizované body sa vyberajú tak, aby boli jednoznačne identifikované v teréne a na snímkach. Na geodetické určenie súradníc vlíčovacích bodov sa používajú terestrické a GPS metódy merania.

13.4.2 Program na automatickú aerotrianguláciu

Program ImageStation Automatic Triangulation (ISAT 04.02) je produkt firmy Z/I Imaging, vykonáva automatickú aerotrianguláciu na digitálnych leteckých snímkach (obr. 13.11).



Obr. 13.11. Hlavné menu programu ISAT 04.02

Programový pracovný postup obsahuje:

- zadanie vstupných dát,
- vytvorenie východiskovej štruktúry bloku obrazmi,
- vytvorenie spresneného pokrytia obrazmi,
- určenie východiskových bodov bloku,
- určenie spresnených bodov bloku,

- výstupné dáta aerotriangulácie.

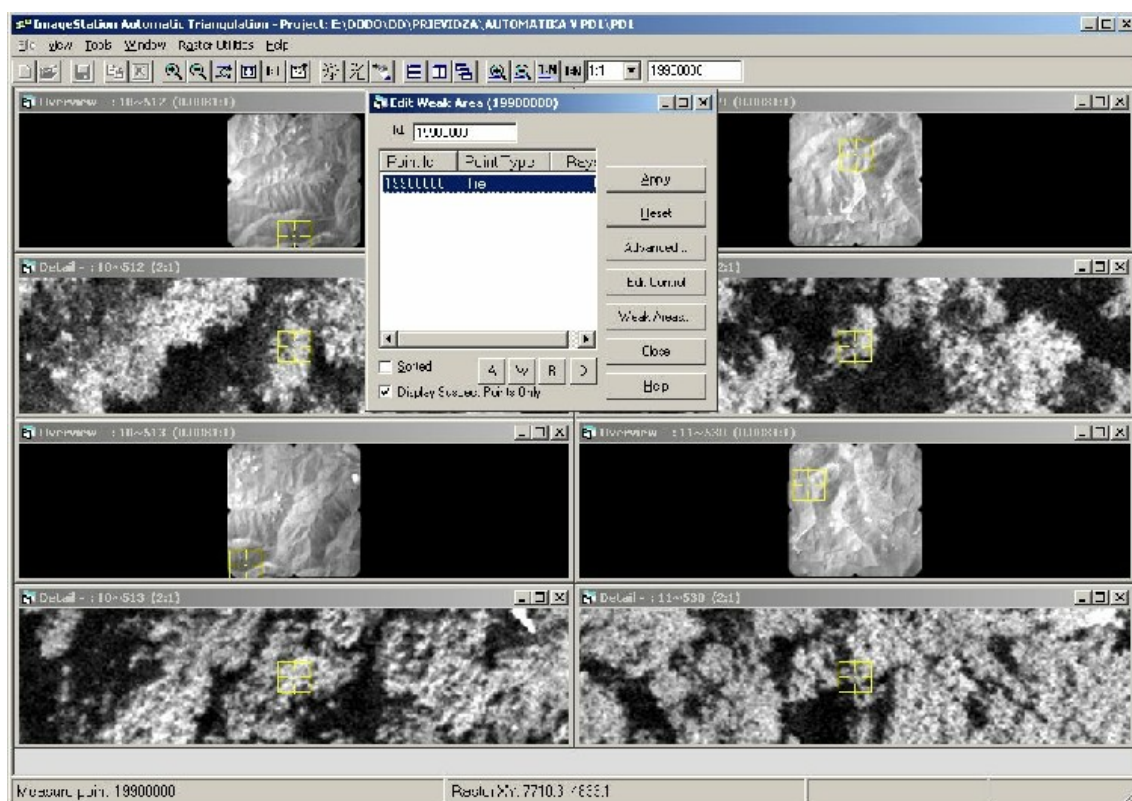
Vstupnými dátami na DAA sú digitálne snímky so známou vnútornou orientáciou, informácie o usporiadaní snímok v pásoch a bloku, parametre fotogrametrickej komory a súradnice vlícovacích bodov. Najlepším postupom je spracovávanie snímok po jednotlivých radách. Vlícovacie body sa merajú pred vytvorením bloku.

Blok obrazov sa vytvára postupným pripájaním jednotlivých obrazov pomocou automatickej digitálnej vzájomnej orientácie a spojením jednotlivých modelov do pásu. Úlohou bloku je vytvoriť vzťažný systém pre všetky obrazy v projekte digitálnej aerotriangulácie, pomocou ktorého sa uskutoční automatický výber spojovacích bodov.

Pracovným postupom DAA je postupne generovať blok od najnižšej po najvyššiu hierarchickú úroveň obrazovej pyramídy. Hrubý blok na najnižšej úrovni sa vytvára výberom bodov podľa základných prvkov obrazu. Obsahuje schému obrazov, východiskové parametre vonkajšej orientácie a približný DMR daného územia. Z týchto informácií sa v následnom kroku vytvára spresnený blok.

Prenos bodov medzi obrazmi a meranie sa postupne vykonáva až po najvyššiu úroveň rozlíšenia. DAA sa vykonáva zväzkovým blokovým vyrovnaním, v ktorom sú určené body bloku.

Automatická vzájomná orientácia. Štartuje na najvyššej úrovni pyramídy, kde sa hľadajú spojovacie body. Obraz má najmenšiu veľkosť a najnižšiu úroveň rozlíšenia. Automatická vzájomná orientácia končí najnižšou úrovňou pyramídy v originálnej veľkosti obrazu a originálnom rozlíšení.



Obr. 13.12. Meranie spojovacích bodov

V každej úrovni riešenia sa vyberajú v prekrytovej časti každého obrazu charakteristické obrazové prvky, z ktorých sa počítajú parametre vzájomnej orientácie. Následne sú prvky prenesené do nasledujúcej nižšej úrovne pyramídy. Spojovacie body a parametre vzájomnej orientácie určené v riešenej úrovni sa využijú ako vstupné informácie pre ďalší cyklus riešenia. Každá dvojica bodov získaná z predchádzajúcej úrovne sa zaregistruje do nasledujúcej nižšej úrovne. Následne sa určuje okolo každého zaregistrovaného bodu hľadacie okno a nové prvky sa zberajú z takto určených

spojovacích okien. Identifikované spojovacie okna sa vzájomne priradujú. Tento programový postup sa nazýva **trasovanie oknami**. Hľadanie spojovacích bodov sa vykonáva v oblastiach, ktorých sa očakávajú vhodné definované prvky.

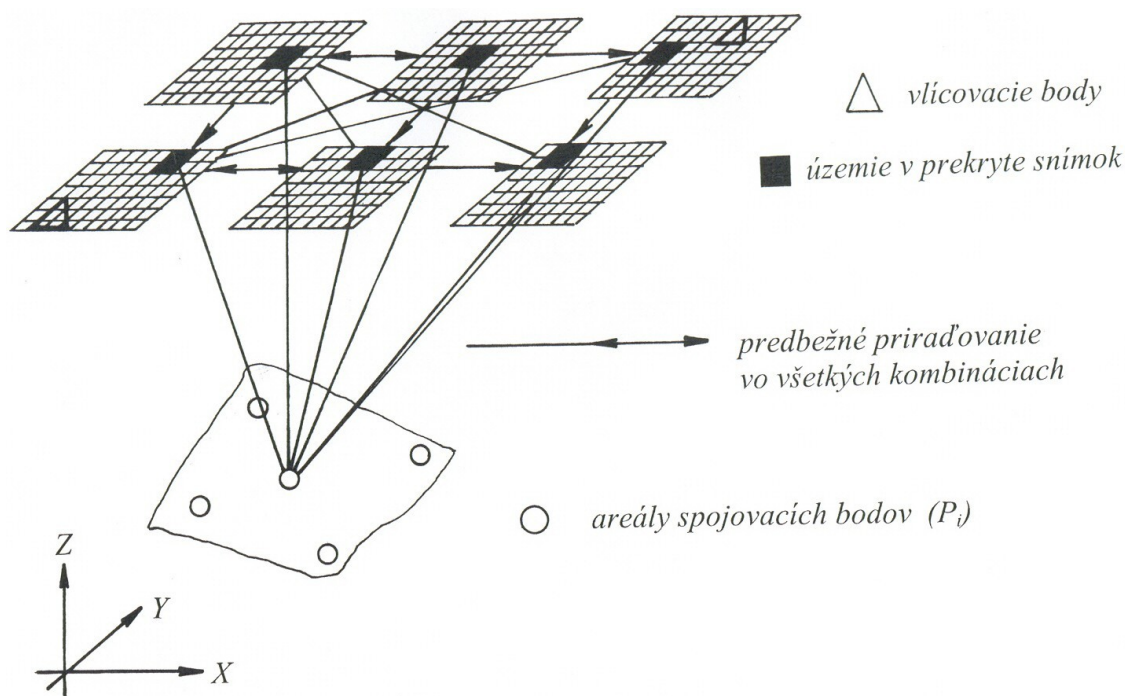
Vyhľadanie spojovacích bodov (prvkov) môžeme vykonať manuálne. V okne Multiphoto sa otvoria všetky snímky v ktorých sa nachádza editovaná oblasť (obr. 13.12). Každá snímka je zobrazená v dvoch úrovniach v základnom areále a detaile. Na každej snímke sa vyberie vhodný identický bod (prvok) a zameria sa. Po zameraní spojovacieho bodu vyberie sa ďalšia oblasť na editáciu bodu.

Výber prvkov sa uskutočňuje v

- základných areáloch obrazov ,
- základných prvkoch obrazov.

Korelácia výberu základných areálov obrazov má spoľahlivú presnosť v oblastiach s dobrou textúrou obrazov. Pri korelačných algoritmoch výberu základných prvkov obrazu sa vyberajú body, línie alebo plochy.

Úlohou **priradovania prvkov v automatickej vzájomnej orientácii** je nájdenie zodpovedajúcich si dvojíc prvkov na dvojiciach snímok. Dosahuje sa to matematickým riešením rovníc priesečkov určujúcich lúčov. Riešenie prebieha metódou kolineárnej transformácie. Po priradení prvkov sa vypočítajú parametre vzájomnej orientácie snímok a vyrovnaním MNŠ sa určia modelové súradnice spojovacích bodov. V priebehu vyrovňovania sa identifikujú hrubé chyby v odpovedajúcich si bodoch. Za hrubú chybu sa považuje odchýlka väčšia ako je veľkosť obrazového elementu na príslušnom stupni úrovne pyramídy. Na záver riešenia v príslušnej úrovni pyramídy sa určia vyrovnaním MNŠ snímkové súradnice, parametre vzájomnej orientácie a modelové súradnice spojovacích bodov.



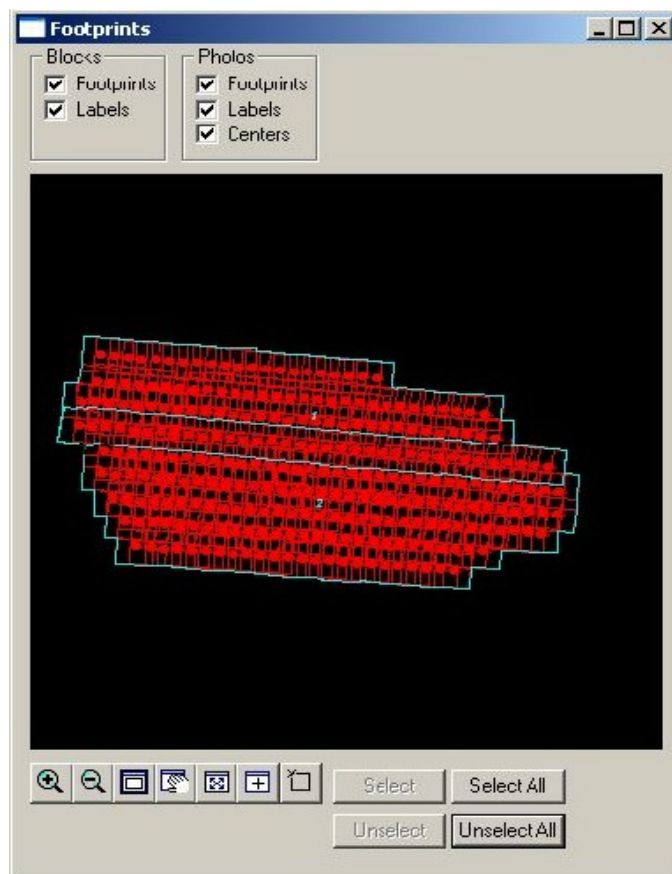
Obr. 13.13 Spojovacie body

Spojenie vytvorených pásov do bloku sa vykoná prostredníctvom spojovacích bodov medzi susednými pásmi (obr.13.13). Pričný prekryt 20-30% dovoľuje automaticky vybrať niekoľko desiatok spojovacích bodov.

Algoritmus DAA končí **zväzkovým blokovým vyrovnaním**. Je to digitálne riešenie vonkajšej orientácie bloku snímok s vyrovnaním MNŠ. Matematickým modelom vyrovnania lúčov bloku je analytická formulácia kolinearnosti snímkového \mathbf{r}' a obrazového vektora \mathbf{r}_p (kap. 11.1). Podmienkové rovnice kolinearných vzťahov (13.13) linearizujeme rozvojom do Taylorovho radu (13.15) pre počiatočné hodnoty projekčných centier x_0, y_0, z_0 a počiatočné hodnoty rotačných uhlov $\varphi = \omega = \kappa = 0$. Neznáme zmeny prvkov vonkajšej orientácie $dx_0, dy_0, dz_0, d\varphi, d\omega, d\kappa$ vzhľadom na uvedené počiatočné hodnoty a vektor \mathbf{l} priestorových súradníc bodu objektu dx, dy, dz sú vyjadrené pomocou parciálnych derivácií funkcií (13.13). Pretvorené rovnice opráv pre snímkový bod, resp. fotogrametrický lúč majú tvar (13.15).

Súčasnú riešenie a vyrovnanie fotogrametrických zväzkov lúčov sa realizuje vyrovnaním bloku snímok. Riešenie automatickej aerotriangulácie vyžaduje znalosť približných hodnôt parametrov vonkajšej orientácie. Niektoré parametre sú približne známe: dĺžka základnice, priemerná výška terénneho reliéfu, priemerná výška letu. Ďalšie vyžadované parametre nie sú známe s dostatočnou presnosťou. Kvalita obrazového priradovania závisí od pozdĺžneho a priečného prekrytu a rozsahu triangulovaného územia.

Dobrá stabilita bloku je zaručená len vtedy, ak je vyhl'adaný veľký počet spojovacích bodov rádovo 100 až 300 bodov na snímku. Hrubé chyby sa dajú identifikovať z titulu vyrovnania MNŠ iba vtedy, ak je ich počet malý. Pri malom počte spojovacích bodov, môže byť triangulovaný blok deformovaný.



Obr. 13.13. Blok snímok

Pri väčších blokoch (obr. 13.14) geometrická stabilita bloku závisí od počtu, vhodného rozloženia, presnosti geodetického určenia a identifikovateľnosti vličovacích bodov. Presné informácie o priestorovej polohe vličovacích bodov pri ich geodetickom určení dovoľuje redukovať počet spojovacích bodov na jednej snímke. Za dobrých podmienok, v otvorenom a plochom teréne s dobrou textúrou obrazu, presnosť určenia súradníc spojovacích bodov dosahuje strednú chybu 0,15 až 0,20 veľkosti obrazového elementu (pixelu).

13.4.3 Presnosť digitálnej automatickej aerotriangulácie

Presnosť DAA hodnotíme vo dvoch úrovniach. Odchýlkami na vlícovacích bodoch spracovávaného bloku a odchýlkami na kontrolných bodoch.

V bloku 6-ich snímok Mgr. Kožuch uvádza stredné chyby odchýlok súradníc na 16-ich vlícovacích bodoch $m_x = 0,16m$, $m_y = 0,15m$, $m_z = 0,09m$. Rozdiely súradníc bodov odmeraných geodeticky a zhustené metódou DAA na 11-ich bodoch vyjadrujú stredné chyby $m_x = 0,49m$, $m_y = 0,35m$, $m_z = 0,64m$. Výsledky boli získané pri DAA snímok mierky 1:25000. Ortofotomapa bola vyhotovená v mierke 1 : 25000. Výsledky DAA vyhovujú presnosti ortofotomapy v mierke 1 : 10000.

V záveroch experimentálnych prác Mgr. Kožuch uvádza, že na presnosť vytvorenej ortofotomapy vplýva faktor presnosti určenia vlícovacích bodov a ich jednoznačná identifikácia v teréne a na digitálnom obraze.