

DETERMINACIÓ COMBINADA DE PUNTS A PARTIR DE DADES D'IMATGES ANALÒGIQUES I DIGITALS

Introducció

Durant els últims anys, la determinació fotogramètrica analítica de punts basada en el mètode de feixos (SCHMID, 1958-59) ha anat desenvolupant-se cada vegada més. Mentre que al començament generalment només s'utilitzaven coordenades deduïdes d'imatges mètriques analògiques, i punts de control, per a determinar les coordenades objecte tridimensionals de punts prèviament triats, amb el temps ha anat augmentant l'interès a integrar tant informació geodèsica general de control i objecte, així com dades de navegació, en un ajust simultani de totes les observacions (EBNER, 1984). S'ha creat el concepte de *determinació combinada de punts*.

Una nova possibilitat de la determinació combinada de punts, obtinguda gràcies a la major disponibilitat de models digitals del terreny (MDT) estesos per tot el país, consisteix a integrar amb utilitat aquestes informacions objecte en tasques específiques.

Tenint en compte que el procés de la determinació combinada de punts utilitzant càmeres mètriques, amb sensors analògics en forma d'una emulsió fotogràfica, es va estendre també a sistemes d'adquisició digitals opto-electrònics amb sensors de línies CCD dins de la fotogrametria aèria, es va crear un model matemàtic ampliat (HOFMANN ET AL, 1984; EBNER I MULLER, 1987). Va ésser O. Hoffmann qui va influir significativament sobre aquest desenvolupament de la tècnica digital d'adquisició i anàlisi (HOFMANN, 1986). D'aquesta manera es poden aprofitar, en principi, els avantatges de l'adquisició dinàmica d'imatges sense deficiències en l'estabilitat geomètrica i l'exactitud de la determinació de punts.

Tècniques d'adquisició d'imatges

Fotografia del terreny amb càmeres aèries

En el cas del vol fotogramètric convencional, el terreny corresponent és fotografiat per una sèrie d'imatges mètriques convenientment superposades, tant en direcció longitudinal com en direcció transversal. El sensor és una emulsió fotogràfica bidimensional sobre

la qual obtenim, durant el període d'exposició, una imatge en perspectiva central del terreny (*figura 1a*). El resultat d'aquesta fotografia instantània s'obté de forma analògica (en una pel·lícula).

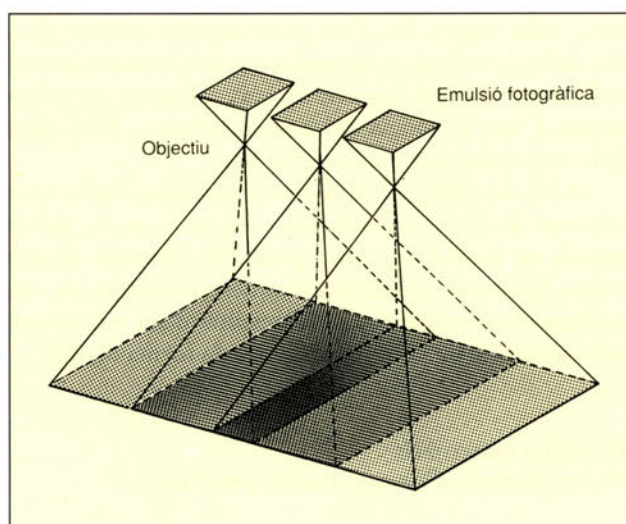
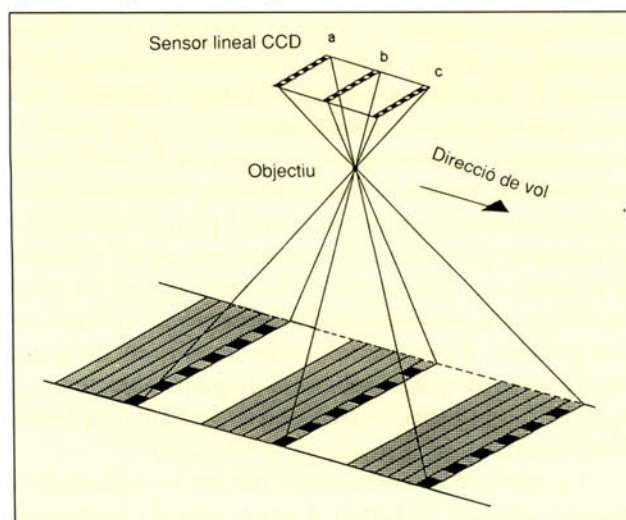


Figura 1a: Vol fotogramètric amb una càmera aèria

Figura 1b: Principi de recollida d'imatge amb una càmera de tres línies



Fotografia del terreny amb càmeres de línia opto-electròniques

Les càmeres de línia opto-electròniques tenen sensors lineals CCD en el pla d'imatge de l'objectiu. Considerem especialment els tipus de càmeres amb tres línies de sensors (càmeres de tres línies). Els sensors, sensibles per a un determinat espectre de longituds d'ona, estan dirigits perpendicularment o lleugerament esbiaixats respecte a la direcció de vol. Durant el vol, els sensors es llegeixen amb una freqüència constant, registrant en cada cicle de lectura una imatge digital que consisteix només en tres línies. Coordinant d'una forma idònia la velocitat del portador de la càmera i la freqüència de lectura, tota la superfície del terreny és representada per píxels aproximadament quadrats, en analogia amb el principi *Push-Broom* (figura 1b). Cada punt objecte és representat tres vegades dins d'una línia, cada vegada des d'un punt de vista diferent (és a dir, del sensor dirigit cap endavant, del sensor vertical i del sensor dirigit cap endarrera), excepte els punts situats a una distància del començament o final de la línia més curta que una longitud base.

Així, la imatge bidimensional instantània amb càmeres aèries és substituïda, respectivament, per la posada en sèrie d'una gran quantitat d'imatges de tres línies, basant-se cadascuna d'aquestes imatges en una orientació exterior pròpia. El resultat d'un vol, doncs, són tres cintes de vídeo obtingudes de forma digital.

El model matemàtic

Procés de dades d'imatge analògiques i digitals

A la fotogrametria analítica se soluciona el problema de la determinació de punts preferentment amb el mètode de feixos. Aquest mètode s'aplica formulant la dependència funcional de les coordenades incògnites de punts objecte $\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i$, i dels paràmetres, també desconeguts $\hat{x}_j, \hat{y}_j, \hat{z}_j, \hat{\omega}_j, \hat{\delta}_j, \hat{\alpha}_j$ de l'orientació exterior de la imatge I_j , per a les observacions fotogramètriques, que són generalment les coordenades x_{ij}, y_{ij} de punts P_i representats a les imatges I_j , a través de la condició de col·linealitat. Podem considerar el raig individual com a unitat elemental exigint que, tant el punt d'imatge com el centre de projecció i el punt objecte, siguin elements d'aquest raig. La condició d'encreuament de raigs homòlegs i la introducció d'informació de control ens fan possible d'estimar simultàniament, en un ajust, totes les coordenades incògnites de punts objecte x_i, y_i, z_i ($i = 1, \dots, n$) i tots els paràmetres d'orientació, també desconeguts $x_j, y_j, z_j, \omega_j, \delta_j, \alpha_j$ ($j = 1, \dots, m$).

La condició de col·linealitat pot ser formulada de la manera següent, a través d'equacions d'observació.

Així:

$$\begin{aligned} \hat{v}_{x_{ij}} &= -f_j \frac{\hat{r}_{11j}(\hat{x}_i - \hat{x}_j) + \hat{r}_{21j}(\hat{y}_i - \hat{y}_j) + \hat{r}_{31j}(\hat{z}_i - \hat{z}_j)}{\hat{r}_{13j}(\hat{x}_i - \hat{x}_j) + \hat{r}_{23j}(\hat{y}_i - \hat{y}_j) + \hat{r}_{33j}(\hat{z}_i - \hat{z}_j)} - x_{ij} \\ \hat{v}_{y_{ij}} &= -f_j \frac{\hat{r}_{12j}(\hat{x}_i - \hat{x}_j) + \hat{r}_{22j}(\hat{y}_i - \hat{y}_j) + \hat{r}_{32j}(\hat{z}_i - \hat{z}_j)}{\hat{r}_{13j}(\hat{x}_i - \hat{x}_j) + \hat{r}_{23j}(\hat{y}_i - \hat{y}_j) + \hat{r}_{33j}(\hat{z}_i - \hat{z}_j)} - y_{ij} \end{aligned} \quad (1)$$

on

x_{ij}, y_{ij} = coordenades imatge del punt P_i representant a la imatge I_j

$\hat{v}_{x_{ij}}, \hat{v}_{y_{ij}}$ = residus de x_{ij}, y_{ij}

f_j = constant de càmera de la imatge I_j

$\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i$ = coordenades objecte incògnites del punt P_i

$\hat{x}_j, \hat{y}_j, \hat{z}_j$ = coordenades objecte incògnites del centre de projecció de la imatge I_j

$\hat{r}_{11j} \dots \hat{r}_{33j}$ = elements incògnites de la matriu de rotació $\hat{R}_j$ de la imatge I_j amb tres paràmetres de rotació independents

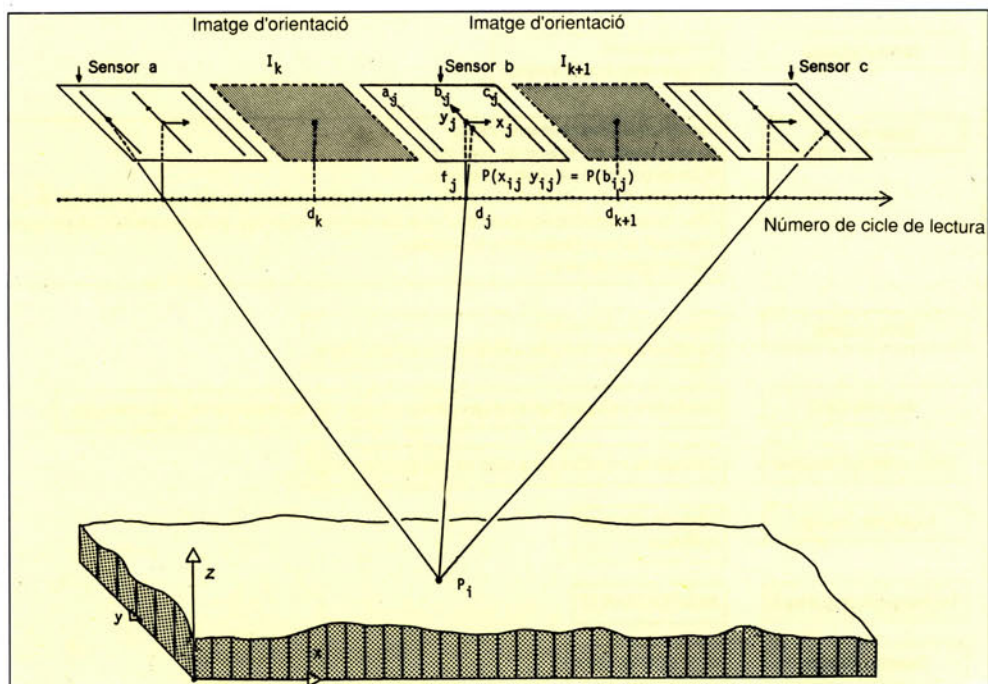
Mentre que en el cas de l'adquisició clàssica d'imatges amb una emulsió fotogràfica com a sensor, el problema de la determinació fotogramètrica de punts pot ésser solucionat directament amb l'equació (1), el cas de l'adquisició digital d'imatges amb sensors de línies, requereix més consideracions.

Donat que, com indiquem a l'apartat Fotografia del terreny amb càmeres de línia opto-electròniques, la representació superficial s'efectua a través d'una lectura continuada dels sensors CCD durant el moviment del portador de la càmera, teòricament s'haurien d'estimar per a cada cicle de lectura els sis paràmetres d'orientació desconeguts de la imatge de línies. Com que això no és factible, seguirem un altre camí. Suposem que els paràmetres d'orientació exterior varien segons un model funcional predeterminat dins d'interval·ls de temps limitats, la duració dels quals depèn de les característiques del vol del portador de la càmera, i que l'orientació exterior de la càmera de línies no s'ha de determinar contínuament durant el vol, sinó només en uns instants discrets. Denominem imatges corresponents a aquests instants imatges d'orientació, perquè només per a elles es calculen els paràmetres d'orientació exterior.

La situació geomètrica per a càmeres de tres línies es representa a la figura 2.

Es determina mitjançant un observador o bé correlació digital el número (no sencer) de cicle de lectura δ_j ; el número (no sencer) de píxel a_{ij}, b_{ij} , o c_{ij} per al punt objecte P_j , representat als sensors a_j, b_j o c_j a les imatges RI_j . Les coordenades imatge corresponents es dedueixen de a_{ij}, b_{ij} , o c_{ij} , i de la situació calibrada dels sensors al pla d'imatge. En lloc d'introduir, però, els paràmetres d'orientació de la imatge I_j directament

Figura 2: Geometria del procés d'enregistrament d'imatge amb una càmera de tres línies



com a incògnites a l'ajust, es substitueixen com a funció dels paràmetres d'orientació de les imatges d'orientació veïnes en (1). En el cas de que suposem una variació lineal dels paràmetres d'orientació exterior entre dues imatges d'orientació, serà vàlid el següent:

$$\begin{aligned} \hat{x}_j &= \frac{d_{k+1} - d_j}{d_{k+1} - d_k} \hat{x}_k + \frac{d_j - d_k}{d_{k+1} - d_k} \hat{x}_{k+1} \\ &\vdots \\ \hat{\alpha}_j &= \frac{d_{k+1} - d_j}{d_{k+1} - d_k} \hat{\alpha}_k + \frac{d_j - d_k}{d_{k+1} - d_k} \hat{\alpha}_{k+1} \end{aligned} \quad (2)$$

on

$\hat{x}_j \dots \hat{\alpha}_j$ = paràmetres incògnites d'orientació de la imatge I_j

$\hat{x}_k \dots \hat{\alpha}_k$ = paràmetres incògnites d'orientació de la imatge d'orientació I_k

$\hat{x}_{k+1} \dots \hat{\alpha}_{k+1}$ = paràmetres incògnites d'orientació de la imatge d'orientació I_{k+1}

d_j = cicle de lectura de la imatge I_j

d_k, d_{k+1} = cicles de lectura de les imatges d'orientació I_k i I_{k+1}

La diferència principal respecte a la determinació clàssica fotogramètrica de punts radica en el fet que com a conseqüència de (2), a les equacions de col·linealitat (1) hi trobem els paràmetres (d'orientació) de més

d'una imatge. La fotografia convencional pot ésser considerada com a cas especial on $I_k = I_j$.

Aquest procediment que acabem d'esbossar es pot aplicar a la utilització tant de càmeres d'una línia com d'aquelles de tres línies. Però únicament si hi ha tres línies serà possible, per la simultaneïtat de la representació amb perspectiva central als sensors ubicats al pla d'imatge, obtenir un model geomètricament estable només amb medicions fotogramètriques.

Un cop introduïda aquesta generalització del model, podrà ésser considerat el procés conjunt de dades imatge clàssiques i digitals. Aleshores es pot parlar de la determinació fotogramètrica generalitzada de punts.

Integració d'informació de control general i objecte

Per a la determinació fotogramètrica de punts, es necessita informació no fotogramètrica per a determinar paràmetres de datum i augmentar l'exactitud i fiabilitat dels resultats. Per a aconseguir això, poden integrar-se a l'ajust del bloc conjuntament amb o bé en lloc de coordenades de punts de control, informacions múltiples en forma d'equacions d'observació o de condició.

Les observacions geodèsiques com distàncies, direccions horitzontals, distàncies zenitals, diferències d'altura, etc., poden sotmetre's, amb les medicions fotogramètriques, a un ajust conjunt. La introducció d'aquestes observacions originals ens porta avantatges

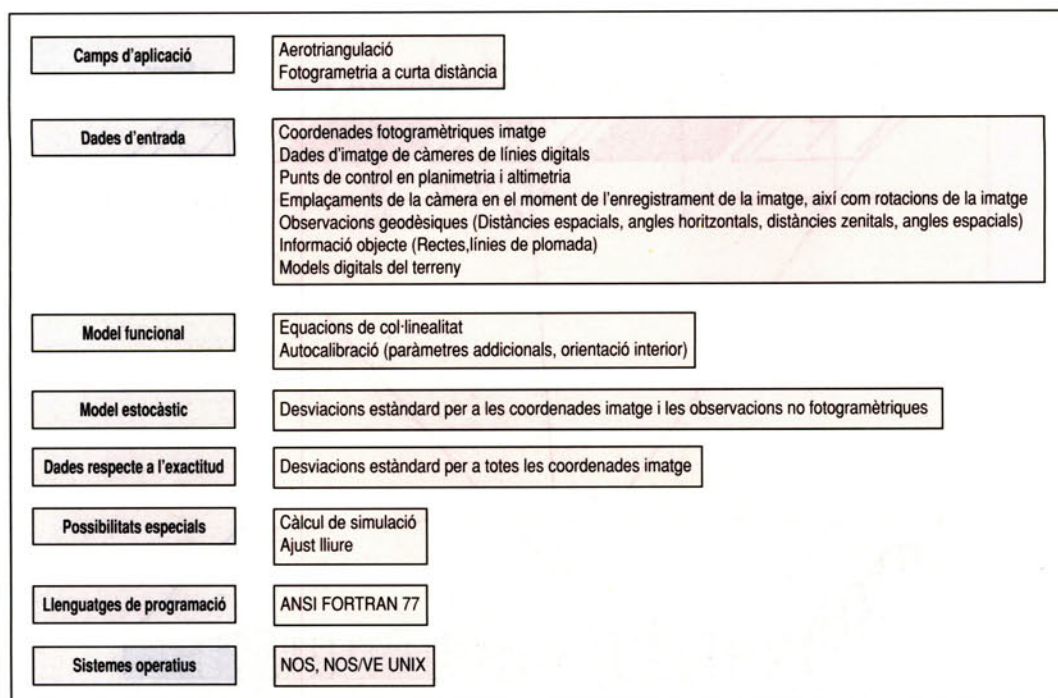


Figura 3. Característiques del programa d'ajust de blocs per feixos de la càtedra de fotogrametria de la Universitat Politècnica de Munic

respecte a un enfoc estocàstic més estricte, respecte a la possibilitat de detectar millor els errors grollers a les dades, i respecte a una major flexibilitat en la planificació conjunta de totes les medicions. La utilització de dades d'orientació procedents de sistemes de navegació com a observacions addicionals en el camp de l'aerotriangulació, representa un objecte important d'investigació i podria influir positivament a la pràctica de la determinació fotogramètrica de punts (ACKERMANN, 1986). Algunes condicions geomètriques deduïbles de la forma de l'objecte o de la situació especial de punts objecte, com per exemple punts situats a rectes o superfícies, poden ser considerades dins del context de l'ajust.

En el cas que per a aquests sistemes combinats s'hagi d'efectuar una solució directa del sistema d'equacions normals, resultaria avantatjós, per a un tractament matemàtic eficient, prendre en consideració l'estructura de connexió que resulta de la matriu de les equacions normals. En el cas que es tracti d'informacions de control general i objecte de caràcter local, no existeix cap influència significativa sobre l'estructura basada en les medicions fotogramètriques, així que la integració pot ser realitzada sense problemes. En cas que no sigui així, podem considerar diversos mitjans com per exemple la reclassificació de les incògnites en el sistema d'equacions normals o l'enfoc de multiplicadors incògnites, el qual ens faria possible considerar, entre altres coses, condicions sense errors entre diverses incògnites d'una forma numèricament estricta (EBNER, 1984).

Donat que en l'aerotriangulació el conjunt d'imatges pot ser d'una dimensió considerable, aquests aspectes matemàtics tenen fonamental importància per a la concepció de sistemes de programes.

Implementació

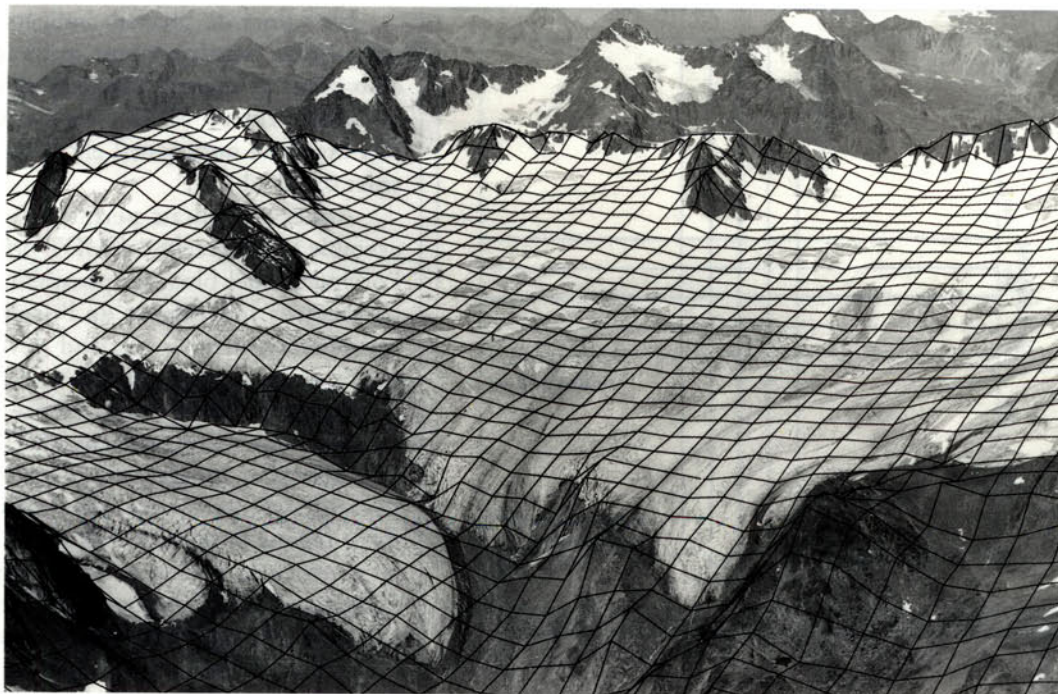
El concepte exposat als capítols anteriors, demostra avantatges pràctics respecte a desenvolupaments de programes dins del marc de la determinació fotogramètrica de punts, donat que possibilita l'ajust combinat, la compensació d'errors sistemàtics a través de paràmetres addicionals, entre altres també en el context de dades d'imatges de càmeres de línies. En el programa d'ajust de blocs per feixos que ha estat desenvolupat per la Càtedra de Fotogrametria de la Universitat Politècnica de Munic, està realitzada la determinació combinada de punts generalitzada (MÜLLER I STEPHANI, 1984). A la figura 3 es pot veure un resum de les característiques d'aquest paquet de programes.

Exemples

Entre les múltiples possibilitats d'aplicació de la determinació combinada de punts, mirarem primerament, mitjançant un exemple pràctic, la integració a l'ajust de bloc d'un model digital del terreny com a informació de control. Després, algunes simulacions respecte a imatges de tres línies demostraran les possibilitats de la determinació de punts amb dades d'imatgeria digital.

Foto 1: Representació del MDT a una fotografia amateur

(Foto: M. Weber)



Orientació d'un bloc fotogramètric amb l'ajut d'un model digital del terreny

La determinació de punts de control o la medició d'informació de control amb el fi d'orientar blocs fotogramètrics, generalment resulta relativament costosa. Per altra part, a molts llocs es construeixen o ja es troben disponibles a bancs de dades, models digitals del terreny o bé regionals, o bé suprarregionals. Per tant se suggereix la idea d'integrar, dins del marc de la determinació combinada de punts, aquesta informació sobre la forma de la superfície de terreny com a ajust conjunt de totes les dades disponibles. Aquest mètode fou presentat per primera vegada en el context d'uns estudis de simulació respecte a imatges de tres línies (EBNER I MÜLLER, 1986). Unes altres anàlisis sobre l'orientació absoluta de models amb l'ajut d'un MDT (model digital del terreny) demostraven una altra aplicació possible de l'enfoc (ROSENHOLM I TORLEGARD, 1987). A continuació considerem la integració d'un MDT a l'ajust del bloc com a informació de control.

El MDT representa una descripció matemàtica de la superfície del terreny, i proporciona l'altura dels punts en funció de la seva situació. En el cas que disposem del MDT en el sistema de coordenades de la compensació de bloc, podem formular per a cada punt P que estigui situat dins del sector de terreny que abarca el MDT una equació d'observació de la forma següent:

$$\hat{v}_{z_k} = \hat{z}_k - z_k(\hat{x}_k, \hat{y}_k) \quad (3)$$

sent:

$\hat{x}_k, \hat{y}_k, \hat{z}_k$ = coordenades incògnites del punt P_k

$z_k(\hat{x}_k, \hat{y}_k)$ = observació deduïda del MDT segons un determinat procediment d'interpolació

$\hat{v}_{z_k}$ = residu de les observacions $z_k(\hat{x}_k, \hat{y}_k)$

Generalment, les observacions $z_k(\hat{x}_k, \hat{y}_k)$ deduïdes del MDT són correlades: tot i això, per a la següent introducció a l'ajust en bloc es van simplificar les seves propietats estocàstiques descrivint-les en forma d'una matriu de pes amb estructura diagonal.

L'aplicació d'aquest mètode la il·lustrem mitjançant un tros d'un vol fotogràfic a la regió del Vernagtferner (Alps d'Otztal, Àustria) (RENTSCH, 1982). Les imatges mètriques a una escala mitjana d'1:20 000 tenen un recorbriment longitudinal i transversal respecte la direcció de vol del 60 i el 30% respectivament. Del vol es varen escollir dues passades de tres imatges cadascuna que abasten una àrea d'uns 4 km x 7 km i unes altures d'entre 2 300 i 3 500 m.

A part de punts de control determinats geodèsicament, disposem per a aquest terreny d'un MDT en forma de trama amb un pas de 40 m. Perquè la forma del terreny quedi ben il·lustrada, s'ha triat una fotografia panoràmica a la qual es va representar, mitjançant una operació matemàtica, una de cada dues files i columnes de MDT (foto 1). La zona representada abarca la part essencial del sector cobert per les imatges mètriques.

El MDT es va deduir amb l'ajut del paquet de programes HIFI (EBNER ET AL, 1980). L'altura d'un

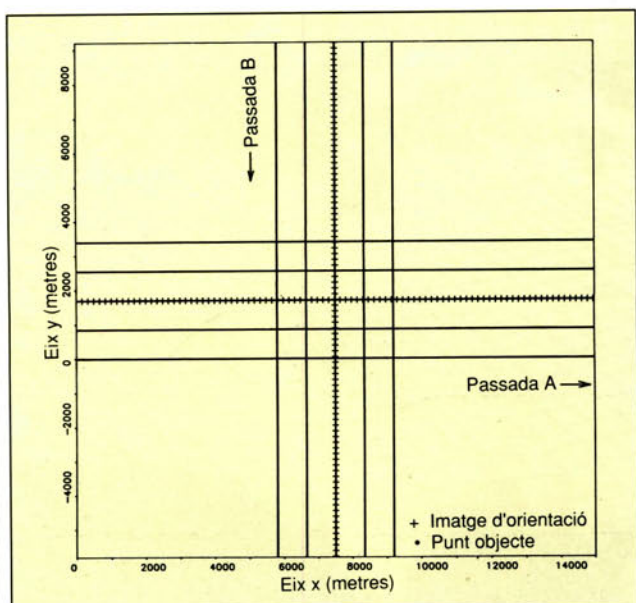


Figura 4: Descripció de la planta dels punts objecte i de les imatges d'orientació

punt qualsevol l'obtenim utilitzant una interpolació bilineal com a funció de les altures dels quatre punts de trama veïns P_r ($r = 1, \dots, 4$). Així, l'observació z_k ($\hat{x}_k, \hat{y}_k$) deduïda del MDT es calcula segons (3) com a funció tant de la coordenada incògnita ($\hat{x}_k, \hat{y}_k$) del punt P_k , com de les coordenades x_r, y_r, z_r ($r = 1, \dots, 4$) dels punts P_r i de l'amplitud de trama d .

Als ajustos en bloc realitzats es van introduir les coordenades dels punts de control amb una exactitud de $\sigma_x = \sigma_y = 0,30$ m o $\sigma_z = 0,20$ m respectivament, i les coordenades imatge amb una precisió d'observació de 8 micres. La desviació estàndard d'una observació deduïda de MDT es va estimar en $\sigma_{z_k}(\hat{x}_k, \hat{y}_k) = 0,20$ m. En total s'havien de determinar les coordenades de 64 punts nous. A la *taula 1* s'indiquen els errors quadràtics mitjans $\hat{\mu}_{\hat{x}}, \hat{\mu}_{\hat{y}}, \hat{\mu}_{\hat{z}}$ de les desviacions estàndard de les coordenades ajustades $\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i$ de tots els punts nous P_i .

	$\hat{\sigma}_0$ [μ m]	$\hat{\mu}_{\hat{x}}$ [m]	$\hat{\mu}_{\hat{y}}$ [m]	$\hat{\mu}_{\hat{z}}$ [m]
P 4 D 0	7.9	0.27	0.27	0.51
P 4 D 47	7.8	0.26	0.26	0.43
P 0 D 47	7.5	1.44	1.46	0.71
P 0 D 33	7.6	1.56	1.60	0.79
P 0 D 15	7.7	2.36	2.83	1.14
P 0 D 7	7.8	7.85	5.83	3.64

Pm: m = Nombre de punts de control en planimetria i altimetria.
Dn: n = Nombre de les condicions MDT segons (3).

Taula 1: Resultats de les compensacions de bloc

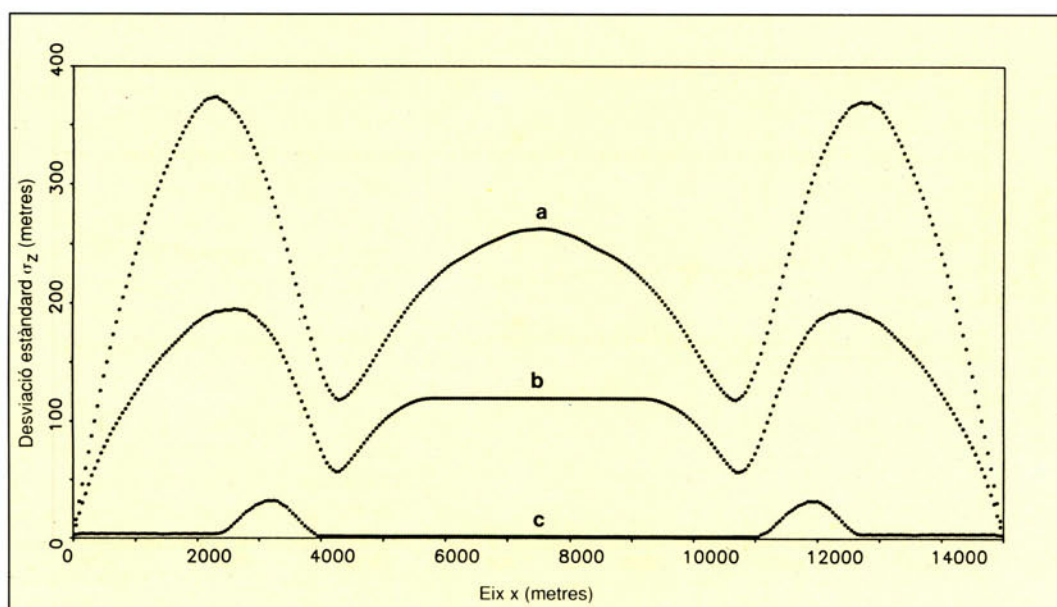
Els valors de precisió indicats a la *taula 1* es van comprovar empíricament mitjançant comparacions amb punts de control independents. Resulta, utilitzant exclusivament un MDT com a informació de control, una exactitud horitzontal entre 1,5 m i 7,1 m i vertical entre 0,8 m i 2,7 m.

Aquests resultats permeten veure que en aquest exemple la integració del MDT possibilita, en principi, l'orientació del bloc. La possibilitat de determinar els paràmetres individuals de l'orientació absoluta i la influència sobre l'exactitud de la determinació de punts, depenen primordialment de la forma de terreny, la qualitat del MDT i la quantitat i situació dels punts considerats a la informació MDT. Sobretot si tenim una quantitat reduïda d'equacions d'observació (3), l'exactitud de les coordenades individuals varia visiblement segons la selecció dels punts. De la configuració geomètrica es poden concloure quins requeriments específics s'han d'imposar a la forma del terreny i la situació dels punts. En aquest exemple, no vam considerar la sensibilitat del mètode respecte a valors d'aproximació deficients de les incògnites i a errors grollers al MDT. No obstant això, el procediment manifesta respecte a la fiabilitat, sobretot en el cas d'una major quantitat de punts, propietats favorables. Encara que fan falta investigacions més àmplies respecte a la possibilitat d'aplicar el mètode en la pràctica, ja podem preveure ara que es poden trobar possibles aplicacions per exemple al camp de l'anàlisi de models per a la cartografia topogràfica i de l'elaboració d'ortofotos. Per tant, la integració de models digitals del terreny com a informació de control addicional pot arribar a tenir importància pràctica per a aquestes tasques.

Simulacions respecte a un vol amb una càmera digital de tres línies

En el context d'un experiment amb avió que va realitzar la Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V. (DFVLR) (Institut Alemany d'Investigació i Experimentació per a Aviació i Navegació Espacial), es va efectuar un experiment previ per a la missió MEOSS (LANZL, 1986) sobrevolant un terreny al nord-est de Munic amb el fi d'obtenir primeres experiències pràctiques respecte a les possibilitats d'anàlisi i el potencial d'exactitud d'imatges digitals de tres línies. Abans de realitzar aquest vol, la Càtedra de Fotogrametria de la Universitat Politècnica de Munic va dur a terme simulacions respecte al vol amb el fi d'utilitzar els coneixements teòrics, com a base per a una estructura de vol i una estratègia de càlcul adequades. La càmera MEOSS és concebuda com a càmera de tres línies amb línies paral·leles; per tant, tot allò que exposem queda limitat a aquest tipus de càmeres. No analitzem el possible augment de l'exactitud mitjançant una modificació de la

Figura 5: Desviacions estàndard σ_{z_i} de les coordenades $\hat{z}_i$ dels punts de l'eix (simulacions a, b, c)



configuració geomètrica de les línies (HOFMANN, 1986). Donat que hi ha simulacions anteriors que han demostrat (EBNER I MULLER, 1986) que en una passada individual obtinguda amb una càmera de tres línies paral·leles no sempre està garantitzada l'estabilitat geomètrica, es va realitzar, seguint una proposta de H. EBNER, un vol encreuat. La càmera de tres línies que es va utilitzar té les qualitats següents:

Constant de càmera	61,10 mm
Distància entre les línies paral·leles	26,29 mm
Dimensió dels pixels	12,7 μm
Quantitat pixel/línia	1728
Freqüència de lectura	80 Hz

Per a realitzar la simulació es van suposar els següents paràmetres pel projecte de vol:

Altura de vol	10 500 m
Velocitat de vol	166 m/s
Longitud de les passades A i B respectivament	15,0 km
Amplitud de les passades A i B respectivament	3,4 km
Distància entre imatges d'orientació	1 s = 166 m
Distància entre punts objecte en la direcció de vol	50 m
Nombre de punts objecte en la direcció transversal a la direcció de vol	5
Coordenada z de tots els punts objecte	500 m
Desviació estàndard de les coordenades imatge $\sigma_O = 5 \mu\text{m}$	

La figura 4 representa una planta de la situació dels punts objecte i de les imatges d'orientació.

A la figura 5 hi veiem les desviacions estàndard teòriques σ_{z_i} de la coordenada $\hat{z}$ dels punts P_i al

llarg de l'eix central de la passada A per a la simulació següent:

- a) Ajust d'una passada individual A i B respectivament;
- b) Ajust del vol encreuat.

Els vèrtexs de les passades A i B respectivament es van introduir cadascun com a punt de control correcte. En el cas del vol encreuat (b) es podien estimar simultàniament d'un total de 18 404 observacions $2\,985 \times 3$ coordenades de punts objecte i 182×6 paràmetres d'orientació, és a dir un total de 10 047 incògnites.

Hi podem deduir el següent:

Queda manifesta la feblesa de la geometria de tres línies en el cas de línies paral·leles en la passada individual (a). Els punts situats a la distància BL (BL = longitud base) de punts de control mostren les desviacions estàndard menors. Això és així perquè en el cas de línies paral·leles es dona una bona connexió de les imatges de línies en la distància BL mentre que les imatges situades entremig són pràcticament independents⁶.

En el cas del vol encreuat (b) s'estabilitzen visiblement les característiques d'exactitud dels punts objecte en el sector que s'ha sobrevolat dues vegades. Tot i això, l'exactitud absoluta per a l'altura dels punts objecte és encara de ± 118 m. Això s'esdevé perquè la part coberta per les dues passades està unida amb els punts de control a través d'un sector dèbil.

Hi ha molt poca transferència de les propietats d'exactitud i de l'estabilitat dels punts mesurats a les dues passades a punts fora d'aquest sector. Aquest fet es pot justificar perquè en el cas de la càmera d'avió MEOSS l'amplitud de la passada és menor que la longitud base. Tal com hem vist en simulacions anteriors

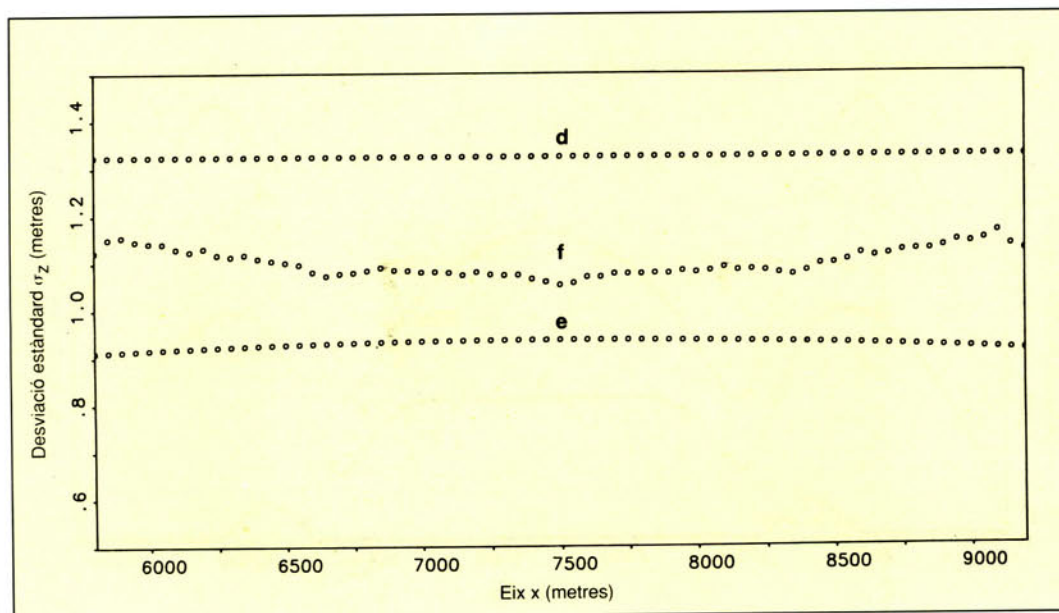


Figura 6: Desviacions estàndard σ_{z_i} de les coordenades $\hat{z}_i$ dels punts de l'eix (simulacions d, e, f)

(EBNER I MÜLLER, 1987), l'estabilització es fa possible sempre que disposem d'una amplitud de passada major. Per a demostrar aquest fet, es va simular addicionalment un vol encreuat del terreny amb una càmera de tres línies amb la doble quantitat de pixels, mantenint igual la geometria de la recepció i la configuració dels punts objecte. Veiem en la figura 6 (c) que en aquest cas hi ha una millora decisiva de l'exactitud absoluta, tot això amb la mateixa configuració dels punts de control.

Els resultats representats a la figura 6 es limiten al sector cobert per les passades A i B en la simulació b. Addicionalment als punts de control situats en els vèrtexs de les pasades es van situar punts complets de control correctes als vèrtexs del sector comú.

Hi veiem les desviacions estàndard σ_{z_i} de les coordenades $\hat{z}_i$ dels punts eix per a les següents operacions matemàtiques:

- d) Ajust d'una passada individual A o B suposant uns paràmetres d'orientació correctes.
- e) Ajust del vol encreuat suposant uns paràmetres d'orientació correctes.
- f) Ajust del vol encreuat b amb quatre punts de controls complets addicionals.

Les simulacions d i e representen l'exactitud límit teòrica per a les coordenades de punts objecte $\hat{z}_i$. Aquests valors límits depenen de la precisió de l'observació sobre la imatge i de la geometria de les interseccions dels raigs.

La figura 6 mostra el potencial d'exactitud del vol encreuat. Les exactituds teòriques σ_{z_i} de les coordenades dels punts objecte resultants en el vol encreuat són millors que l'exactitud límit en la passada individual i només insignificativament pitjors que les exactituds límit per a l'altura en el vol encreuat.

Fent un resum podríem dir el següent:

En l'experiment de vol que hem simulat aquí la part a considerar haurà de limitar-se al sector cobert per les dues passades, on, no obstant això, podem esperar moltes bones característiques d'exactitud dels punts objecte.

Amb una configuració adequada de vol (blocs amb diverses passades perpendiculars d'una amb l'altra) es pot realitzar també en el cas de línies paral·leles un procés geomètric rígid d'imatges de càmeres digitals de tres línies.

Les possibilitats d'un augment de l'exactitud mitjançant una modificació de la geometria de la càmera (inclinació de línies) i la integració de dades de navegació s'han de seguir estudiant.

Conclusions

Els exemples aquí exposats demostren l'eficiència i les possibilitats de la determinació combinada de punts. El procés de dades imatge de càmeres digitals de tres línies en el model matemàtic generalitzat ens permet una anàlisi geomètricament rígida d'imatges dinàmiques. En el futur proper està previst realitzar una comprovació de les conclusions teòriques mitjançant dades pràctiques.

Data de recepció de l'original: 10.88

Heinrich Ebner
Catedràtic de Fotogrametria
Universitat Politècnica de Munic

Franz Müller
Günter Strunz
Enginyers en Geodèsia i Fotogrametria
Universitat Politècnica de Munic

Traducció: Andrea Rienitz

BIBLIOGRAFIA

- ACKERMANN, F.: Camera Orientation Data for Aerial Triangulation. *Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 26, part 3/1, pàgs. 1-17. Rovaniemi, 1986.
- EBNER, H.: Combined Adjustment of Photogrammetric and Non-photogrammetric Information. *Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 25, part A3a, pàgs. 130-138. Rio de Janeiro, 1984.
- EBNER, H.; HOFMANN-WELLENHOF, B.; REISS, P.; STEIDLER, F.: HIFI - A Minicomputer Program Package for Height Interpolation by Finite Elements. *Int. Arch. of Photogrammetry*. Vol. 23, part B4, pàgs. 202-215. Hamburg, 1980.
- EBNER, H.; MÜLLER, F.: Processing of Digital Three Line Imagery Using a Generalized Model for Combined Point Determination. *Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 26, part 3/1, pàgs. 212-222. Rovaniemi, 1986.
- EBNER, H.; MÜLLER, F.: Combined Point Determination Using Digital Data of Three Line Opto-Electronic Cameras. *Technical Papers ASPRS-ACSM Annual Convention*. Vol. 2, pàgs. 293-302. Baltimore, 1987.
- HOFMANN, O.: Dynamische Photogrammetrie. *Bildmessung und Luftbildwesen* 54 (1986), S. 105-121.
- HOFMANN, O.; NAVÉ, P.; EBNER, H.: DPS - A Digital Photogrammetric System for Producing Digital Elevation Models and Orthophotos by Means of Linear Array Scanner Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 50 (1984), S. 1135-1142.
- LANZI, F.: The Monocular Electro-Optical Stereo Scanner (MEOSS) Satellite Experiment. *Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 26, part 1, pàgs. 617-620. Stuttgart, 1986.
- MÜLLER, F.; STEPHANI, M.: Effiziente Berücksichtigung geodätischer Beobachtungen und Objektinformationen in der Bündelblockausgleichung. *Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 25, part A5, pàgs. 558-569. Rio de Janeiro, 1984.
- RENTSCH, H.: Die Orthophotokarte Vernagtferner 1979. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 18 (1982), S. 85-91.
- ROSENHOLM, D.; TORLEGARD, K.: Absolute Orientation of Stereo Models Using Digital Elevation Models. *Technical Papers ASPRS-ACSM Annual Convention*. Vol. 4, pàgs. 241-250. Baltimore, 1987.
- SCHMID, H.: Eine allgemeine analytische Lösung für die Aufgabe der Photogrammetrie. *Bildmessung und Luftbildwesen* 26 (1958). S. 103-113 und *Bildmessung und Luftbildwesen* 27 (1959). S. 1-12.
- STRUNZ, G.: Processing of Non-Photogrammetric Data in Combined Block Adjustment. *Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 26, part 3/3, pàgs. 231-240. Rovaniemi, 1986.

Diskette BASF Maxima[®] y Diskette BASF Extra.

Mayor reserva de seguridad.

