EL POSICIONAMENT DE LES CÀMERES DE FOTOGRAFIA AÈRIA EN VOL A TRAVÉS DEL SISTEMA GPS APLICAT A L'AEROTRIANGULACIÓ

Peter Friess
Doctor Enginyer en Geodèsia i Fotogrametria
Institut de Fotogrametria. Universitat de Stuttgart

Introducció

Des del 1973, el Departament de Defensa dels Estats Units d'Amèrica està desenvolupant el sistema de navegació via satèl·lit anomenat *Navigation System with Time and Ranging Global Positioning System* (NAVSTAR GPS). Aquest sistema, un cop plenament desenvolupat, permetrà als seus usuaris corresponentment equipats arreu del món, i en qualsevol moment, realitzar una determinació tridimensional de posicions i velocitats en temps real (GOAD (ed.), 1985 i WELLS *et al.*, 1986). Durant la fase de test, que s'està realitzant en l'actualitat, s'ha pogut veure que es tracta d'un sistema poc costós per a determinar posicions geodèsiques mitjançant el qual, utilitzant tècniques de postprocés, és possible arribar a una exactitud de centímetres o millor en aplicacions estètiques (REMONDI, 1984; GOAD (ed.), 1985 i FELL (ed.), 1986) i a una exactitud d'un decímetre per aplicacions cinemàtiques en un avió (MADER, 1986 i VAN DER VEGT, 1989). A més, si s'efectuen modificacions específiques de la disposició del sistema de mesura, el GPS, en principi, també podrà utilitzar-se per a la determinació d'angles (HARTL i WEHR, 1985 i ROTH i SINGH, 1986).

És a dir, en el camp de la fotogrametria aèria, el NAVSTAR GPS podria usar-se no només per a la navegació de l'avió, sinó també per a la determinació directa de l'orientació exterior (posició i actitud) de la càmera aèria i de qualsevol sensor, per exemple, un enregistrador làser de perfils per a l'adquisició de models del relleu (ACKERMANN, 1989 i LINDENBERGER, 1989). Com a última conseqüència resultaria que, en el cas de la càmera aèria, els mètodes actuals indirectes d'orientació mitjançant punts de control -és a dir, els procediments de la triangulació aèria- en el futur seran superflus en alguns casos.

Actualment, però, mitjançant el GPS només podem determinar posicions, de manera que no és possible observar directament tots els paràmetres d'orientació exterior d'una fotografia aèria. Per tant, en l'actualitat la idea és incloure les posicions GPS en un ajust combinat de blocs com a observacions addicionals per a les posicions de la càmera. S'han fet estudis de simulació que han donat com a resultat que sols per a les posicions de la càmera, les observacions addicionals ja són suficients perquè, en un ajust combinat de blocs, no faci falta introduir punts de control per motius d'exactitud. Aleshores, els punts de control només són necessaris per a subsanar el defecte de rang, és a dir, especialment, per a resoldre el problema del datum (ACKERMANN, 1986 i FRIESS, 1986). Per tant, la integració de dades de posició GPS en un ajust combinat de blocs ja seria, com a primer pas de la determinació directa d'orientació, de gran utilitat pràctica i econòmica per als procediments de triangulació aèria. Les posicions GPS s'han de determinar amb una exactitud de 5 a 20 m en les aplicacions de petita escala, amb una exactitud d'un metre, aproximadament, per a la cartografia de mitjana o gran escala, i, finalment, amb una precisió d'un decímetre si es tracta d'una aplicació d'alta precisió de gran escala (ACKERMANN, 1986).

A continuació mostrarem, basant-nos en els resultats de l'anàlisi empírica de l'exactitud del vol de test holandès *Flevoland*, quina exactitud es pot assolir mitjançant GPS per a una determinació de posició durant un vol fotogramètric.

Posicionament cinemàtic relatiu

El NAVSTAR GPS es basa en la mesura de distàncies i la seva variació mitjançant senyals electromagnètics emesos contínuament pels satèl·lits GPS. En la pràctica geodèsica, s'utilitza com a observació principal la mesura d'alta precisió de la fase de l'ona portadora. A aquestes ones, se'ls aplica la següent relació fonamental (entre d'altres, REMONDI, 1984 i WELLS *et al.*, 1986):

$$-\lambda\ \phi_F^S(t_i) = \rho_F^S(t_i) - c_o\ dt^S(t_i) + c_o\ dt_F(t_i) + \Delta A_F^S(t_i) - \lambda\ N_F^S(t_1)$$

sent:

$$\rho_F^S(t_i) = \sqrt{[X^S(t_i) - X_F(t_i)]^2 + [Y^S(t_i) - Y_F(t_i)]^2 + [Z^S(t_i) - Z_F(t_i)]^2}$$

$\phi_F^S(t_i)$: observació de la fase portadora del receptor de l'avió F al satèl·lit S, en el moment t_i,
$X_F(t_i)$, $Y_F(t_i)$, $Z_F(t_i)$: coordenades de l'antena GPS de l'avió en el moment t_i,
$X^S(t_i)$, $Y^S(t_i)$, $Z^S(t_i)$: coordenades del satèl·lit S en el moment t_i,
dt^S: paràmetre de rellotge del satèl·lit S en el moment t_i,
dt_F: paràmetre de rellotge del receptor de l'avió F en el moment t_i,
$\Delta A_F^S(t_i)$: influència atmosfèrica en el moment t_i,
$N_F^S(t_1)$: ambigüitat de la fase en el primer instant d'observació,
c_o: velocitat de la llum en el buit,
λ: longitud d'ona del senyal del satèl·lit.

La precisió de la mesura de la fase portadora és d'un a dos mil·límetres, mentre que la imprecisió d'alguns paràmetres del model (coordenades dels satèl·lits, paràmetres de rellotge, atmosfera) pot ser d'uns deu metres (WELLS *et al.*, 1986). Si, a part de l'observació amb el receptor de l'avió, observem simultàniament els mateixos satèl·lits amb un receptor fix des d'un punt de referència R, podem eliminar alguns paràmetres del model efectuant combinacions lineals entre les observacions d'ambdós receptors. Així reduiríem la influència de les imprecisions dels altres paràmetres a la posició de l'antena de l'avió. Una de les possibles combinacions lineals són les diferències simples (REMONDI, 1989 i WELLS *et al.*, 1986):

$$\Delta\phi_{FR}^S(t_i) = -\lambda\ .\ (\phi_F^S(t_i) - \phi_R^S(t_i))$$

En cas que simplifiquem, suposant que les coordenades del satèl·lit i del punt de referència són conegudes i no contenen errors, queden determinades les distàncies entre el punt de referència i els satèl·lits i les ambigüitats del receptor de referència. Per a determinar els paràmetres d'ambigüitat del receptor mòbil se suposa que la seva posició inicial relativa al punt de referència és una dada que no conté errors i s'ha determinat a priori a base d'observacions estacionàries. La influència de l'atmosfera es pot prendre en consideració mitjançant correccions *a priori*. Portant tots els paràmetres coneguts al costat esquerre de l'equació, obtenim el model funcional de les diferències simples de fase per al posicionament relatiu cinemàtic:

$$\Delta\phi_{FR}^S(t_i) + \rho_R^S(t_i) - \Delta A_{FR}^S(t_i) + \lambda\ .\ \Delta N_{FR}^S(t_1) = \rho_F^S(t_i) + c_o\ .\ \Delta dt_{FR}(t_i)$$

Les diferències simples es consideren variables aleatòries normalment distribuïdes, igualment ponderades, mentre que les coordenades del receptor de l'avió i el paràmetre de rellotge per moment d'observació es consideren incògnites. En cas que fos factible realitzar, en qualsevol moment, observacions simultànies amb tots dos receptors d'almenys quatre dels mateixos satèl·lits, seria possible determinar el model de forma unívoca. Si tenim més de quatre observacions a cada moment, les incògnites poden ser estimades mitjançant un ajust. Atès el caràcter simplificador de les seves suposicions, aquest model no aporta una solució estricta, sinó aproximada, l'exactitud de la qual depèn de la reducció -provocada per la formació de diferències entre les observacions- d'influències de diversos paràmetres del model. Bàsicament, aquesta reducció és una funció de la distància entre els dos receptors (WELLS *et al.*, 1986).

Investigacions empíriques

El vol de test *Flevoland* va ser planificat pel Servei Geodèsic i Hidrogràfic (*Rijkswaterstaat*), a Delft, en cooperació amb les empreses KLM Aerocarto i Sercel, i es va realitzar el 10 i 12 de juny de 1987. La Universitat de Stuttgart hi va participar en el context de l'àrea especial d'investigació *Navegació d'Alta Precisió* (SFB 228). En aquest test, la comprovació independent de l'exactitud de la determinació cinemàtica de posicions GPS durant el vol, s'efectua amb l'ajut de la triangulació en bloc fotogramètric.

El bloc inclou deu passades d'una mitjana de divuit imatges (longitud de la passada, aproximadament, 4 km). Les imatges són a escala 1:3 800, sent el recobriment longitudinal d'un 70% i el recobriment transversal d'un 50-60%. La càmera aèria utilitzada, Wild RC 10, va ser modificada de tal forma que, en el moment de l'obertura de l'obturador, un sensor sensible a la llum passa un impuls al receptor GPS.

D'aquesta manera va ser possible correlacionar els moments d'exposició i els moments d'observació GPS amb una precisió d'1 msec (VAN DER VEGT, BOSWINKEL i WITMER, 1988). Les observacions GPS es van realitzar amb un Sercel TR5S-B a l'avió i un Sercel NR52 a un punt de referència dins de l'àrea de test. El punt de referència coincideix amb un dels punts de control. Tant el NR52 com el TR5S-B són receptors d'una freqüència i de cinc canals, codi C/A (LE COCQ i BOUCHER, 1985). Per regla general, s'observaven cinc satèl·lits amb una cadència de 0,6 sec. Només durant la passada dos i la primera meitat de la passada tres, a causa d'una oclusió, solament es varen poder observar quatre satèl·lits, cosa que va degradar extremadament la geometria de l'observació. El RDOP ($RDOP = \sqrt{traça\ (A^TA)^{-1}}$, A = matriu de coeficients de l'equació 3), una mesura per a analitzar la qualitat de la geometria de l'observació, és trenta per a la segona passada i cinquanta-set per a la tercera, en comparació amb les altres passades, que tenen un RDOP de cinc. Com més petit és el RDOP, millor és la geometria de l'observació.

Les observacions GPS de la fase portadora es van processar mitjançant el model de diferències simples. Per a determinar les coordenades del satèl·lit, es va aprofitar la informació del missatge del satèl·lit (efemèrides transmesa) (WELLS *et al.*, 1986). Donat que es tractava d'observacions d'una freqüència, la influència de la ionosfera no podia ser eliminada. Per a contemplar la influència de la troposfera, es va utilitzar el model Hopfield modificat (REMONDI, 1984). La relació temporal entre les posicions de l'antena GPS i les posicions de la càmera, es va establir mitjançant una interpolació lineal.

L'ajust fotogramètric de blocs del conjunt d'imatges es va realitzar segons el mètode de feixos, recolzats per 47 punts de control senyalitzats, determinats també mitjançant GPS (VAN DER VEGT, BOSWINKEL i WITMER, 1988). Així, les coordenades del centre de projecció es van poder deduir amb una exactitud de 4 a 5 cm per a X,Y, i de 2 a 3 cm per a Z. Aquests valors de comprovació serveixen de control per a les coordenades de l'antena i per tant permeten la verificació absoluta del posicionament cinemàtic GPS amb un alt grau d'exactitud. Com que els punts de control també han estat determinats mitjançant GPS, les coordenades de l'antena i les del centre de projecció estan donades dins del mateix sistema de referència i per tant poden ser comparades directament. Per raons de claredat, les coordenades que originàriament eren incloses al sistema de referència geocèntric cartesià WGS 84, s'han transformat a un sistema topocèntric local.

Per a una anàlisi d'exactitud s'utilitzen pel moment d'exposició t_j les diferències $\Delta X^A_P(t_j)$, $\Delta Y^A_P(t_j)$, $\Delta Z^A_P(t_j)$, entre les coordenades del centre de l'antena GPS (A) i les coordenades del centre de projecció (P) de la càmera aèria, així com les distàncies $S^A_P(t_j)$ calculades d'aquelles diferències. La precisió de la diferència de coordenades correspon a la precisió de les coordenades del centre de l'antena GPS, reduïdes al centre de projecció. Contràriament a les distàncies, les diferències de coordenades encara contenen la influència pel diferent angle de posició de l'avió entre dos instants seguits d'exposició. Per tant, les distàncies tenen més valor per a l'anàlisi d'exactitud. Com que durant el vol de test *Flevoland* l'antena estava situada en perpendicular de la càmera, la precisió de la distància S^A_P representa bàsicament l'exactitud en la coordenada Z. Els valors correctes de les diferències de coordenades entre l'antena i la càmera aèria (ΔX_c, ΔY_c, ΔZ_c, S_c) es van mesurar independentment.

A continuació, es resumeixen només els resultats més importants del vol de test *Flevoland*. Una descripció detallada de les anàlisis, així com de la discussió de resultats, es troba a FRIESS, 1990.

L'anàlisi de l'exactitud del posicionament cinemàtic GPS es va efectuar, al principi, individualment per cadascuna de les passades del bloc. D'una comparació directa de les distàncies calculades de les diferències de coordenades $\Delta X^A_P(t_j)$, $\Delta Y^A_P(t_j)$, $\Delta Z^A_P(t_j)$ amb la distància mesurada a l'avió va resultar que mitjançant un posicionament cinemàtic relatiu s'aconsegueix immediatament una precisió de posició de 4 a 10 cm; excepte en el cas que la geometria de l'observació sigui extremadament dolenta. Per a la passada amb un RDOP de 57, l'error quadràtic mitjà de la distància S^A_P respecte del seu valor correcte és de 86 cm.

Figura 1a: Trajectòria de vol 10.06.1987

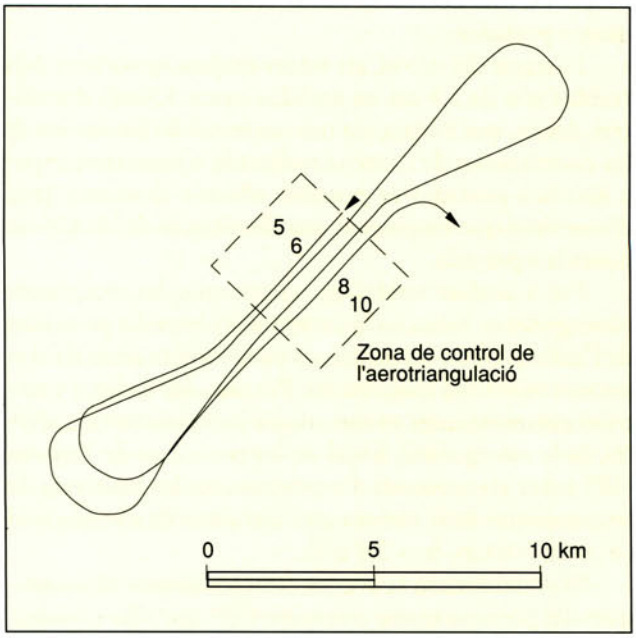
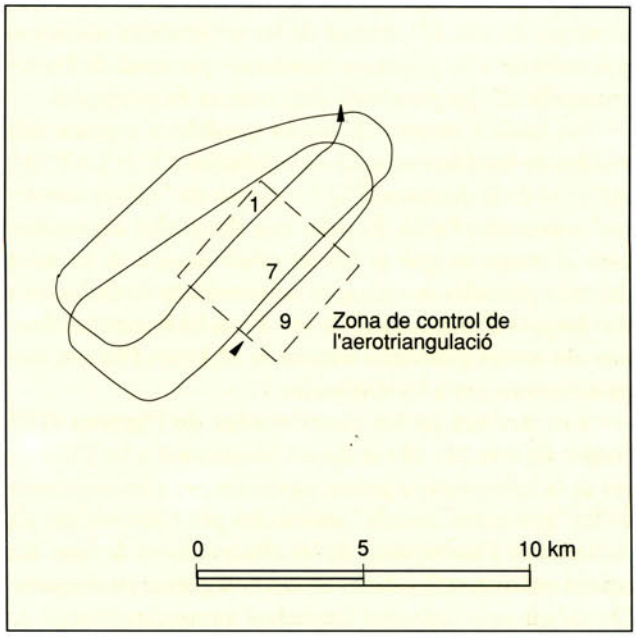


Figura 1b: Trajectòria de vol 12.06.1987



La utilització prevista de les posicions GPS com a observacions addicionals de les posicions de la càmera, permet el modelatge *a posteriori* de característiques sistemàtiques de les coordenades de l'antena dins del model funcional de la triangulació aèria en bloc; per exemple, mitjançant desplaçaments de l'origen o regressions lineals per passada.

Després d'un desplaçament de l'origen per passada, l'error quadràtic mitjà restant de la distància S_p^A és d'un màxim de 5,1 cm per a les passades amb cinc satèl·lits observats amb una constel·lació poc favorable (RDOP de 30,57). Si en el modelatge d'errors *a posteriori* s'avança encara un pas més, admetent per a cada passada una correcció lineal, s'obté aproximadament el mateix nivell d'exactitud de 2 a 5 cm per a totes les passades. Per tant, mitjançant una correcció lineal és possible compensar *a posteriori* la influència d'una geometria d'observació extremadament desfavorable durant un període breu de temps. En cas de les passades amb bona geometria d'observació, el modelatge refinat mitjançant regressions lineals per passada, no millora essencialment l'exactitud. Així, mitjançant desplaçaments constants, la deriva de les posicions d'antena GPS per a les passades curtes d'una longitud de 4 km queda prou aproximada.

Els resultats descrits fins aquí, es refereixen a passades individuals tractades per separat, d'una longitud de 4 km cadascuna, i a una duració d'una mica més d'un minut. Només un conjunt de dades de cadascun dels dos dies de vol va resultar apte per a analitzar la qualitat de la determinació cinemàtica de posicions durant períodes més llargs de vol, incloses les parts no rectilínies de la trajectòria. Aquests conjunts inclouen les observacions a cinc satèl·lits que han estat enregistrades continuadament durant uns 15 minuts. Les *figures 1a* i *1b* representen la projecció sobre el pla horitzontal de les dues trajectòries de vol. El control de les trajectòries només es pot realitzar a les zones on coneixem –per medi de l'aerotriangulació– les posicions dels centres de projecció.

La *taula 1* mostra els errors quadràtics mitjans dels residus de les diferències de coordenades $\Delta X_p^A(t_j)$, $\Delta Y_p^A(t_j)$, $\Delta Z_p^A(t_j)$ i de la distància $S_p^A(t_j)$ respecte als "valors correctes" mesurats a l'avió. És palès que els residus augmenten amb el temps en què es fan les observacions. A les dues darreres passades de cadascun dels conjunts de dades (és a dir, després d'una duració de vol d'uns 15 minuts) s'obtenen uns errors quadràtics mitjans de 30,3 cm i 19,8 cm, respectivament per a les distàncies S_p^A.

Les derives en les coordenades de l'antena GPS (vegeu *figures 2a* i *2b*) es deuen bàsicament a les incerteses de la informació *a priori*, especialment a les incerteses de les "posicions inicials" utilitzades per a determinar els paràmetres d'ambigüitat de les observacions de fase. En aquest vol de test, les dades es van enregistrar en disquets. Donada la seva capacitat limitada d'emmagatzematge, hi va haver interrupcions en l'enregistrament de les dades que van produir més ambigüitats de fase. A fi de determinar aquestes ambigüitats, es van calcular indirectament, a través de les posicions de la càmera aèria, "posicions inicials" per a cadascun dels conjunts de dades. A partir d'algunes anàlisis amb dades estàtiques (FRIESS, 1990), però, se sap que una falta de precisió d'un decímetre en la posició inicial (relativa al punt de referència) i la conseqüent falta de precisió en els paràmetres d'ambigüitat ja pot provocar derives considerables en les coordenades.

Dia de vol	Passades Núm.	(imatges)	$E.Q.M.DX_p^A$ (cm)	$E.Q.M.DY_p^A$ (cm)	$E.Q.M.DZ_p^A$ (cm)	$E.Q.M.DS_p^A$ (cm)
10.06.1987	5	(20)	8,2	9,1	3,6	3,68
	8	(17)	18,8	7,6	10,9	12,3
	6	(20)	10,4	23,4	20,6	21,4
	10	(17)	22,3	27,6	27,4	30,3
12.06.1987	9	(18)	10,2	9,7	8,1	8,9
	7	(17)	8,1	23,8	13,0	15,8
	1	(16)	19,1	28,6	15,5	19,8

Taula 1: Vol de test *Flevoland*, exactitud absoluta del posicionament cinemàtic relatiu en el vol amb observacions GPS de la fase portadora ($DX_p^A = \Delta X_p^A(t_j) - \Delta X_{,}$, etc.)

De les *figures 2a* i *2b*, on es representen les distàncies $S_p^A(t_j)$ respecte del temps pels dos dies de vol, es pot desprendre que les derives de les coordenades en les distàncies contemplades són gairebé lineals. Aquest fet es confirma si comparem els residus de S_p^A després d'una aproximació lineal de les derives per passada amb els que s'obtenen després d'una aproximació lineal de les derives global per a totes les passades. El primer dia de vol, el valor mitjà quadràtic dels residus de S_p^A després d'una correcció lineal per passada va ser de 3,2 cm, i de 3,6 cm després d'una correcció lineal conjunta per a totes les quatre passades.

El segon dia de vol, els valors mitjans quadràtics dels residus són de 3,9 cm en ambdós casos. Queda demostrat, doncs, que mitjançant una correcció de les derives de les coordenades de l'antena realitzada conjuntament per a diverses passades és possible obtenir el mateix grau d'exactitud que mitjançant una distribució de les derives passada a passada.

Per a acabar voldríem repetir que les exactituds obtingudes es basen en la comparació entre les posicions de l'antena GPS i les posicions de la càmera aèria als respectius moments d'exposició. Per tant, les dades d'exactitud exposades més amunt encara inclouen tant els efectes de la interpolació lineal de les posicions de l'antena GPS sobre els moments d'exposició com les incerteses de les posicions de la càmera que serveixen de comparació ($\hat{\sigma}_X = \hat{\sigma}_Y = 4$ cm, $\hat{\sigma}_Z = 2{,}8$ cm).

El coneixement sobre les característiques sistemàtiques del posicionament cinemàtic GPS que s'ha obtingut

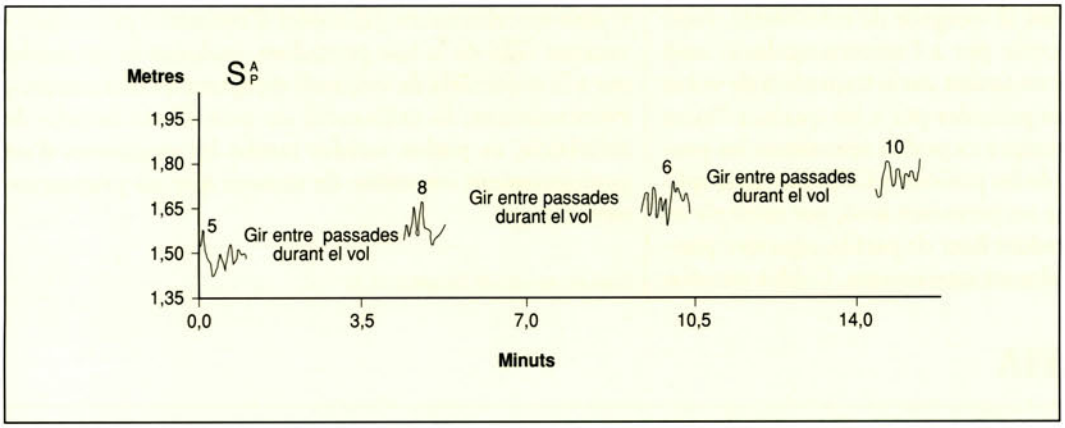


Figura 2a: Primer dia de vol, 10.06.1987. Distància entre el centre de l'antena GPS i el centre de projecció, calculada a partir de les coordenades del centre de projecció de la càmera aèria (de l'ajust de feixos del bloc) i les coordenades de l'antena GPS (de la determinació relativa cinemàtica de posicions mitjançant observacions GPS de la fase portadora)

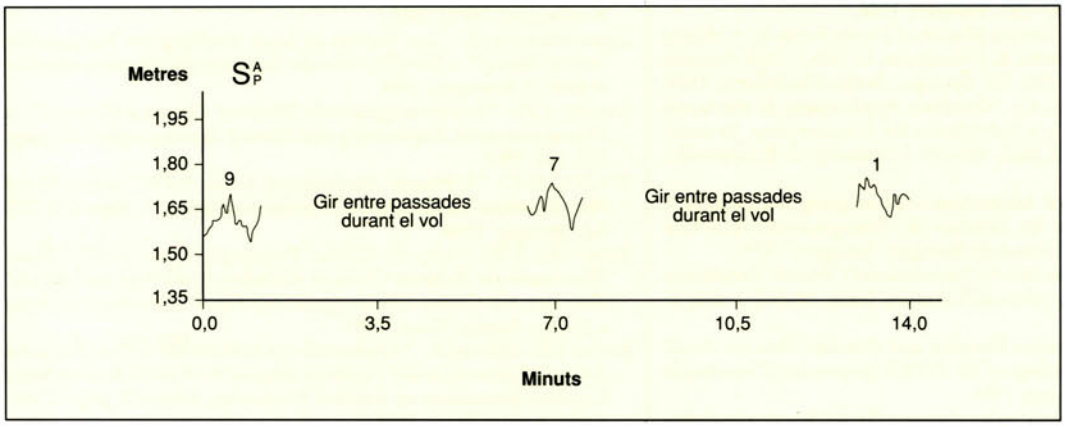


Figura 2b: Segon dia de vol, 12.06.1987. Distància entre el centre de l'antena GPS i el centre de projecció, calculada a partir de les coordenades del centre de projecció de la càmera aèria (de l'ajust de feixos del bloc) i les coordenades de l'antena GPS (de la determinació relativa cinemàtica de posicions mitjançant observacions GPS de la fase portadora)

a través de l'anàlisi empírica ens permeten treure les següents conclusions per a la seva aplicació a l'aerotriangulació. El model funcional de la triangulació de feixos amb l'ajut de GPS hauria de preveure paràmetres lineals de derives que permetin un modelatge *a posteriori* de les característiques sistemàtiques de les coordenades de l'antena que es produeixen com a conseqüència de les influències no incloses en els models del posicionament GPS. La determinabilitat d'aquests paràmetres s'ha de garantir a través d'una disposició adequada dels punts de control.

La introducció de paràmetres de deriva hauria de ser flexible, de tal manera que a cada cas se'n puguin triar, bé per a només una passada, bé conjuntament per a diverses passades (vegeu COLOMINA, 1989 i FRIESS, 1990). Una aproximació lineal de les derives permet reduir una sèrie d'influències que en el cas d'una utilització operativa a la pràctica no sempre poden ser excloses:

- la influència d'una geometria d'observació poc favorable durant un curt període de temps, com a conseqüència d'una oclusió de satèl·lits;
- la influència d'una determinació d'ambigüitats poc exacta durant el vol, després d'una oclusió de satèl·lits;
- la influència dels efectes no modelats restants, malgrat el posicionament cinemàtic relatiu (formació de diferències entre les diverses observacions), especialment en el cas que la distància entre l'avió i el punt de referència sigui més gran que 100 km.

Una estimació *a posteriori* de derives en l'ajust fotogramètric de blocs dóna la seguretat necessària per a la utilització operativa de l'aerotriangulació amb l'ajut de GPS.

Perspectives

Els resultats obtinguts permeten la conclusió final que, en el futur, el posicionament cinemàtic GPS tindrà una gran importància pràctica i econòmica en el camp de la fotogrametria aèria. L'exactitud que requereix l'aerotriangulació respecte a les posicions de la càmera observades de forma excèntrica, és plenament satisfeta. Tan aviat com el NAVSTAR GPS garanteixi -mitjançant una constel·lació de satèl·lits adequada- una utilització operativa, es pot preveure que l'aerotriangulació amb l'ajut de GPS s'aplicarà en la pràctica fotogramètrica. L'objectiu dels futurs vols de test serà especialment l'estudi de les propietats d'exactitud del posicionament cinemàtic durant vols d'algunes hores i de les dificultats que comportin (canvis en la constel·lació dels satèl·lits, oclusions de satèl·lits en les parts no rectilínies de la trajectòria,

distàncies de > 100 km al receptor de referència). Això darrer, però, no és crític per a l'aerotriangulació amb l'ajut de GPS, perquè en aquest cas la trajectòria de vol es pot dividir segons les passades per a les quals, a l'ajust combinat de blocs, sempre es poden aproximar les propietats sistemàtiques de les posicions GPS. En cas d'aplicacions, en canvi, que no permeten això, per exemple en el context d'enregistradors làser de perfils, aquestes qüestions resulten especialment interessants. Caldrà estudiar si amb un refinament del model d'estimació per a observacions GPS de la fase portadora, incloent-hi un model per a la trajectòria de vol, amb receptors de deu canals, i, eventualment, la utilització de més d'una estació de referència, es poden satisfer també les exigències d'un posicionament cinemàtic de sensors que no proporcionen imatges.

Data de recepció de l'original: 11.90

BIBLIOGRAFIA

ACKERMANN, F.: "The Use of Camera Orientation Data in Photogrammetry", a *Proceedings of the ISPRS-Symposium (Commission I)*, pàgs. 93-100. Stuttgart, 1986.

ACKERMANN, F.: "Digital Terrain Models of Forest Areas by Airborne Laser Profiling", a Linkwitz, K. i Hangleiter, U. (eds.): *High Precision Navigation*, pàgs. 229-250. Ed. Springer. Berlin-Heidelberg, 1989.

LE COCQ, C. I BOUCHER, C.: "Geodetic Applications of the Sercel TR5S GPS Receiver", a *Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen*, volum 20-2, pàgs. 465-474. Universitat de Bundeswehr. Munic, 1985.

COLOMINA, I.: "Combined Adjustment of Photogrammetric and GPS Data", a *Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie*, volum 13, pàgs. 313-328. Universitat de Stuttgart. Stuttgart, 1989.

FELL, P.: *Proceedings of the Fourth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning*, volum I/II. Austin, Texas, 28 abril-2 maig de 1986.

FRIESS, P.: "Effects of Camera Position and Attitude Data on Aerial Triangulation", a *Proceedings of the ISPRS-Symposium (Commission I)*, pàgs. 101-111. Stuttgart, 1986.

FRIESS, P.: *Kinematische Positionsbestimmung für die Aerotriangulation mit dem NAVSTAR Global Positioning System*. DGK Reihe C. Tesi doctoral. 1990.

GOAD, C.C.: *Proceedings of the First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System*. Rockville, Maryland, 15-19 d'abril de 1985.

GROTEN, E. I STRAUSS, R.: "GPS-Techniques Applied to Geodesy and Surveying", a *Notes in Earth Sciences*. Ed. Springer. Berlin, Heidelberg, Nova York, Londres, París, Tokio, 1988.

HARTL, PH. I WEHR, A.: "Coordinate Transformation Procedures for GPS-Attitude Control", a *Proceedings of the ISPRS-Symposium (Commission I)*, pàgs. 207-226. Stuttgart, 1985.

Institute of Navigation: "Global Positioning System", a *Journal of The Institute of Navigation*, volums 1 al 3. Washington, 1980, 1984, 1986.

KING, R.; MASTERS, E.; RIZOS, C.; STOLZ, A. I COLLINS, J.: *Surveying with GPS*. Universitat de New South Wales, monografic 9. Kensington, NSW, 1985.

LINDENBERGER, J.: "Test Results of Laser Profiling for Topographic Terrain Survey", a *Schriftenreihe des Institutes für Photogrammetrie*, volum 13. Stuttgart, 1989.

LUCAS, J.R.: "Aerotriangulation Without Ground Control", a *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, volum 53, pàgs. 311-314. 1987.

MADER, G.L.: "Dynamic Positioning Using GPS Carrier Phase Measurements", a *Manuscripta Geodaetica*, núm. 11, pàgs. 273-277. Ed. Springer. 1986.

REMONDI, B.W.: *Using the Global Positioning System (GPS) Phase Observable for Relative Geodesy: Modeling, Processing, and Results*. Tesi doctoral. Centre d'Investigació de l'Espai. Universitat de Texas a Austin. Austin, Texas, 1984.

ROTH, B.D. I SINGH, R.: "Applications of NAVSTAR GPS to Precision Attitude Determination", a *Proceedings of the Fourth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning*, volum II, pàgs. 1 345-1 359. Austin, Texas, 1986.

SEEBER, G.: *Satellitengeodäsie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Walter de Gruyter. Berlin, Nova York, 1989.

VAN DER VEGT, J.W.; BOSWINKEL, D. I WITMER, R.: "Utilisation of GPS in Large Scale Photogrammetry", a *International Archives of Photogrammetry*, volum 27, part B11, pàgs. 413-429. Kyoto, 1988.

VAN DER VEGT, J.W.: "GPS Test Flight Flevoland", a *Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie*, volum 13, pàgs. 285-298. Universitat de Stuttgart. Stuttgart, 1989.

WELLS, D.E.; BECK, N.; DELIKARAOGLOU, D.; KLEUSBERG, A.; KRAKIWSKY, E.J.; LACHAPELLE, G.; LANGLEY, R.B.; NAKIBOGLOU, M.; SCHWARZ, K.P.; TRANQUILLA, J.M. I VANICEK, P.: *Guide to GPS Positioning*. Canadian GPS Associates. Fredericton, Nova Brunswick, Canadà, 1986.

VOCABULARI ESPECÍFIC

Ajust combinat de blocs: Ajust d'una xarxa fotogramètrica (triangulació aèria) en què a més de les observacions pròpies de la triangulació aèria (coordenades imatge i coordenades d'uns pocs punts de control) s'hi inclouen altres observacions (per exemple, observacions geodèsiques). En el cas que tracta aquest article, les observacions addicionals són les coordenades de l'antena de l'avió en el moment de les diferents exposicions. En general, el terme ajust combinat és sinònim d'ajust de xarxes híbrides o, equivalentment, d'ajust de xarxes amb observacions heterogènies.

Datum: En el context de l'article, es refereix al sistema de referència en què cal expressar les coordenades dels punts del terreny, la determinació dels quals és un dels principals objectius de la triangulació aèria.

Constel·lació: El conjunt de satèl·lits usats pel Sistema de Posicionament Global (GPS). Segons el context, també pot significar el conjunt de satèl·lits visibles, durant cert interval de temps, des d'un punt determinat de la superfície de la Terra.

Deriva: Funció del temps que indica l'error en la determinació de posicions.

Geometria de l'observació: Situació dels satèl·lits visibles en el moment de l'observació en termes del seu azimut i elevació sobre l'horitzó. Degut a que la determinació de la posició del receptor es basa en la seva distància respecte els diferents satèl·lits, quant més regular és la distribució dels satèl·lits observats millors són les posicions que se'n dedueixen.

GPS: Sistema de Posicionament Global (*Global Positioning System*). És un sistema de posicionament de la constel·lació NAVSTAR (*Navigation System with Time and Ranging* -Sistema de Navegació, Temps i Distàncies).

Observable: Magnitud física susceptible de ser mesurada directament (per exemple, distàncies, angles, etc.). Les observacions són el resultat d'efectuar mesures –d'observar– aquests observables.

Orientació exterior: En fotogrametria, els sis paràmetres (3 de posició i 3 d'actitud) que determinen la situació i orientació a l'espai d'un fotograma.

Passada: En fotogrametria aèria, el conjunt de fotografies que l'avió fotogramètric ha realitzat durant el període de vol en què ha seguit una trajectòria rectilínia sobre la zona d'interès. El conjunt dels fotogrames -agrupats en passades- forma el bloc fotogramètric.

Paràmetres del model: Les variables del model matemàtic que descriuen el problema (en aquest cas la xarxa fotogramètrica) i que es poden determinar mitjançant les observacions. Paràmetres i observacions estan relacionats per les fórmules del model.

Posicionament: Determinació de posicions d'objectes estacionaris o en moviment. Posicionament relatiu o diferencial és la determinació de posicions respecte a un punt determinat de referència.