

Analisi delle prestazioni di un sistema multispettrale per fotogrammetria aerea digitale: il rilievo di Stromboli, marzo 2007

Witold Wolski (*), Alberico Sonnessa (*), Ernesto Bernardo (*),
Gianluca De Angelis (*), Maria Marsella (*)

(*) DITS, Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade, Area di Geodesia e Geomatica,
Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza",
Via Eudossiana 18, 00184 Roma, tel. 0644585098

Abstract

Durante l'Emergenza Stromboli 2007, a seguito della ripresa di una intensa attività del vulcano, sono stati eseguiti sull'intera isola rilievi aerofotogrammetrici con una *large format frame camera* "Digital Mapping Camera" DMC prodotta da Z/I Imaging – Intergraph. L'Airborne Sensor Management System della DMC è stato interfacciato con un Applanix POS-AV 510 (Position and Orientation System for Airborne Vehicles, un sistema GNSS-INS di fascia alta per sensori aviotrasportati). Il presente lavoro descrive le precisioni ottenute per i parametri di orientamento esterno delle immagini DMC acquisite su Stromboli utilizzando dati Applanix processati con software proprietari in dotazione al POS-AV 510; vengono inoltre descritti i risultati del controllo della stabilità nel tempo dei parametri di calibrazione del POS-AV 510.

During the Stromboli 2007 Emergency, after a new phase of the volcanic activity in February-March, the island has been completely covered by aerial photogrammetric surveys performed with a large format frame camera "Digital Mapping Camera" DMC produced by Z/I Imaging – Intergraph. The Airborne Sensor Management System of the DMC was interfaced with an Applanix POS-AV 510 (Position and Orientation System for Airborne Vehicles, a high-end GNSS-INS system for airborne sensors). The present work describes the Exterior Orientation accuracies of the Stromboli DMC images obtained with Applanix data processed with proprietary softwares. The POS-AV calibration parameters stability control is described too.

Nel mese di febbraio 2007 è ripresa una intensa attività vulcanica sull'Isola di Stromboli, arcipelago delle Eolie. L'Area di Geodesia e Geomatica del DITS (Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade, Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza") è stata incaricata di realizzare DTM ed ortofoto ad alta risoluzione per disporre in tempi rapidi di un accurato rilievo topografico del vulcano durante le fasi di attività più intensa. I voli di acquisizione dati e il *post-processing* sono stati affidati a ditte private previa definizione delle specifiche tecniche. Per i rilievi aerofotogrammetrici è stato utilizzato il sistema Digital Mapping Camera interfacciata con un sistema Applanix POS-AV 510 GNSS-INS (sistema di navigazione, posizionamento e orientamento satellitare-inerziale) e dotata di piattaforma giro-stabilizzata Zeiss T-AS per il controllo di deriva e verticalità dell'asse ottico principale. La DMC è un sistema *all-digital frame-camera*, multispettrale a 4 bande con $f_{\text{eq}} = 120$ mm con un complesso di 4 ottiche con CCD operanti in pancromatico e 4 ottiche con CCD operanti nelle singole bande Rosso, Verde, Blu, Infrarosso vicino. Il sistema integrato è in grado di produrre in *post-processing* immagini raster di dimensioni 13824 pixel *across track* x 7680 pixel *along track* da circa 106 Mpixel totali, con risoluzione radiometrica pari a 12 bit per canale (pancromatiche, a colori pan-sharpened, all'infrarosso-falso colore o a 4 bande). Il software Intergraph di *post-processing* implementa i certificati di calibrazione del complesso di ottiche

installato nel corpo camera e consente la produzione immagini virtualmente prive di distorsione radiale. Il sistema integrato DMC- POS-AV 510 è in grado di fornire tutte le diverse serie di immagini per ogni presa ed in diversi formati, ognuna corredata di parametri di orientamento esterno (dati EO), istante e data di acquisizione e diversi altri parametri e costituisce un ottimo esempio di tecnologia applicata per l'alta produttività nell'industria della geoinformazione. L'utilizzo di dati EO in stazioni fotogrammetriche digitali (unico limite: capacità di calcolo) consente la ricostruzione automatica rapida di blocchi aerofotogrammetrici di dimensioni anche grandi, saltando diverse fasi del processo produttivo tradizionale.

I dati EO ottenuti da sistemi GNSS-INS possono essere in ogni caso utilizzati come input



Fig. 1 – Isola vulcanica di Stromboli, 15 marzo 2007: riproduzione di foto aerea della Sciara del Fuoco acquisita con sistema DMC. Si osservi la bocca di efflusso e la colata lavica nella porzione in basso a sinistra con relativa nube di vapore nel punto in cui la colata raggiunge il mar Tirreno.

per moduli di Triangolazione Aerea (TA, automatica o semiautomatica), per ulteriore raffinamento dei calcoli, da ritenersi in generale sempre necessario per ridurre eventuali errori sistematici. Infatti tali dati sono ottenuti in modo del tutto indipendente dalle immagini (a meno del legame diretto dei parametri acquisiti nel volo di calibrazione).

In tale quadro il 15 marzo 2007 è stato eseguito un primo volo su Stromboli decollando dall'aviosuperficie di Scalea (CS) in Calabria, presso la quale la Ditta esecutrice ha successivamente allestito un nuovo poligono di calibrazione per collaudo ufficiale di dati aerofotogrammetrici di una P.A.

I dati acquisiti su Stromboli sono basati su un unico progetto/piano di volo (tre strisciate a copertura della parte emersa del vulcano: due "basse" a quota 2000 m s.l.m. per la copertura delle porzioni emerse più basse dell'edificio vulcanico ed una "alta" a 2500 m s.l.m. a copertura della zona craterica sommitale, tutte con prua/heading 050-230, scala lastra media equivalente pari a 1:16667 e pixel medio nominale a terra di circa 15-20 cm). Le immagini sono state acquisite nelle primissime ore del pomeriggio per garantire una buona illuminazione solare e visibilità aerofotogrammetrica della "Sciara del Fuoco", l'enorme frana sul versante N-W dell'isola che ha immersione a 310° ed è permanentemente interessata da complessi fenomeni di instabilità e che nel periodo febbraio-maggio 2007 è stata interessata da intensi fenomeni di rimodellamento determinato dallo svuotamento progressivo di una camera magmatica, con relativa colata e deflusso lungo il settore Nord-Est della Sciara fino ad incontrare il mare e proseguendo poi lungo il pendio sottomarino.

I primi dati aerofotogrammetrici digitali DMC acquisiti sull'isola di Stromboli sono costituiti da un blocco fotogrammetrico di 38 immagini a copertura dell'isola, dai dati RAW del POS-AV 510 integrato e sincronizzato con la DMC (frequenza campionamento GPS di bordo:10 Hz; frequenza campionamento dati INS: 200Hz), da dati GPS a frequenza 1 Hz (ricevitore a doppia frequenza con antenna su centrino appositamente installato presso la postazione della Guardia Costiera di Stromboli (di seguito indicato come "GPS_BASE", monografato). Tutti i dati sono stati restituiti nel sistema di riferimento nativo del GPS: DATUM WGS84, proiezione cartografica UTM, fuso 33. La traiettoria D-GPS del centro di fase dell'antenna di bordo è stato calcolata con modulo POSGPS del software POSPAC 4.31 in dotazione al sistema POS-AV510, utilizzando le correzioni differenziali ottenute con dati del ricevitore posto sul punto GPS_BASE. Mediante modulo POSPROC è stato eseguito uno *smoothing inerziale* della traiettoria GPS introducendo nel *processing* i valori degli *offset* (centro fase dell'antenna GPS - centro IMU - centro presa DMC) ottenendo una *smoothed best estimate trajectory* (file SBET) utilizzata poi nel modulo CALQC (insieme al file degli istanti di presa/ID fotogrammi ed al file dei *Ground Control Points*).

Il modulo AT del CALQC ha generato un grande numero di TIE POINTS, PASS POINTS fra i quali, dopo controlli di qualità delle misure, sono stati selezionati ed utilizzati 167 punti, con risultati della TA sintetizzati nelle tabelle in Fig. 2 e 3.

	AT	M	GC	tot.
Numero totale di Pass Points	53	25	-	78
Numero totale di Tie points	43	45	-	88
Numero totale di GCPs	-	-	1	1
Numero totale parziale di punti per tipo	96	70	1	167
Numero complessivo di punti misurati	288	376	6	670

Fig. 2 – Punti misurati con AT eseguita con CALQC del POSPAC 4.31
(AT=Automatic Triangulation; M=Manual; GC=Ground Control)

	Statistiche	Rx (micron)	Ry (micron)	Parallax (m)
96 punti tipo AT - statistiche su 288 misure	MIN	-15,000	-17,000	0,000
	MAX	6,000	12,000	0,276
	MEDIA	-0,045	-0,087	0,033
	DEV STD	2,522	2,424	0,031
70 punti tipo M - statistiche su 376 misure	MIN	-9,000	-9,000	0,000
	MAX	12,000	9,000	0,142
	MEDIA	0,117	0,011	0,041
	DEV STD	2,245	2,154	0,025
1 punto tipo GCP - statistiche su 6 mi- sure	MIN	-10,000	-2,000	0,029
	MAX	0,000	3,000	0,133
	MEDIA	-4,500	0,500	0,069
	DEV STD	4,370	1,761	0,045

Fig. 3 – Statistiche sui risultati della AT eseguita con modulo CALQC del POSPAC 4.31

Date le dimensioni del pixel equivalente nominale delle immagini DMC (12 micron), si rileva che:

- le misure effettuate sui punti di tipo AT individuati con *matching* automatico hanno deviazioni standard pari ad una frazione del pixel della DMC e dell'ordine di 2,5 micron, circa 0.20 pixel;
- le misure effettuate sui punti di tipo M scelti ed introdotti manualmente dall'operatore su un fotogramma e collimati in automatico dal CALQC sugli altri fotogrammi, hanno deviazioni standard leggermente più basse delle rispetto a quelle dei punti AT e dell'ordine di 2,1-2,2 micron, circa 0.17-0,18 pixel;

- le 6 misure effettuate sul GCP “GPS_BASE” introdotto manualmente su un fotogramma e collimato in automatico su altre cinque immagini delle tre strisciate di progetto, hanno una deviazione standard dei residui più alta rispetto a quelle dei punti AT ed M (dell’ordine di 4,37 micron lungo l’asse X delle immagini e 1,8 micron lungo l’asse Y); il “peggiore” risultato lungo l’asse X è determinato dalle collimazioni del punto GPS_BASE da immagini delle strisciate 1 e 3, acquisite da quote differenti di 500m, determinando ciò una maggiore parallasse).

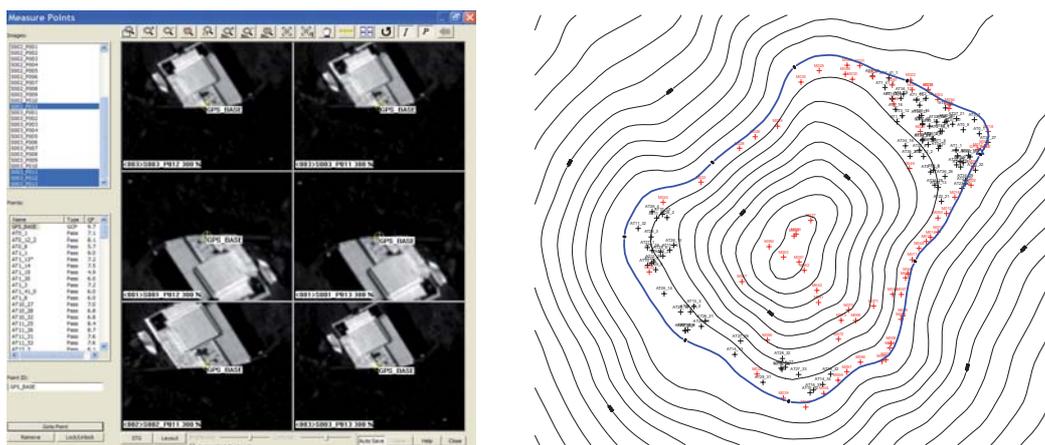


Fig. 4 – A sinistra: esempio di collimazione del GCP “GPS_BASE” (Zoom 300%, 6 immagini).
 A destra: planimetria dei punti AT, M e GC per il controllo e il raffinamento della soluzione GNSS-INS dei dati EO
 (in blu: linea di costa e punto GC; in nero: curve di livello ad equidistanza 100 m e punti AT; in rosso: punti M).

Le differenze tra risultati di TA con misure automatiche e semi-automatiche/manuali possono così essere descritte: a) la fase di processamento AT con CALQC consente di ottenere in generale buoni risultati, tuttavia nel caso del volo datato 15 marzo 2007 gli algoritmi di *matching* automatico non ottengono una distribuzione uniforme di Tie e Pass Points sul blocco fotogrammetrico. In questo caso ciò è determinato principalmente (si veda la Fig. 1) dalla bassa riflettività di buona parte dei terreni vulcanici di Stromboli e dalla presenza di due zone ad altissima concentrazione di vapor d’acqua e quindi altissima riflettività (sia nella zona craterica sommitale che al piede della Sciara dove la colata incontra il mare); b) la fase di introduzione manuale di punti M “scelti ad hoc dall’operatore” e collimati in semi-automatico dal CALQC porta a risultati leggermente migliori in termini di deviazioni standard sulle misure – pur evidenziando che non tutte le scelte effettuate dall’operatore sono “ideali”; c) l’introduzione del punto “GPS_BASE” - che non influisce nel calcolo dei boresight angles – è l’unico modo per ridurre errori sistematici di georeferenziazione del blocco fotogrammetrico applicando tre traslazioni rigide lungo gli assi E, N, H_ell del sistema cartografico diriferimento; d) L’utilizzo di un solo GCP di tipo “non fotografico” per il calcolo e la correzione del *Datum Shift* è penalizzante (il centrino è stato installato e predisposto al solo scopo di trattamento dati GPS e non per utilizzo “fotogrammetrico”). La Ditta esecutrice ha tuttavia certamente posto attenzione alla collimazione di tale punto “fotogrammetricamente difficile” per ridurre il più possibile gli scarti sulle sue misure. Gli effetti della natura “non fotografica” del punto GPS_BASE sono evidenti considerando la relativamente grande parallasse nelle collimazioni ed i residui leggermente più alti sulle misure del punto lungo l’asse X delle immagini S001_P012 e S003_P011 (pari a circa 10 micron) che complessivamente “disturbano sensibilmente” la soluzione. Per quanto riguarda la calibrazione angolare di sistemi GNSS-INS su camere aerofotogrammetriche

(che consiste essenzialmente nella stima dei “difetti angolari di montaggio” della IMU sul corpo camera, espressi come differenze angolari “boresight angles” tra gli assi dei sistemi di riferimento solidali rispettivamente al corpo camera e al corpo della IMU) è nota nella prassi operativa la necessità della verifica periodica della stabilità dei parametri di calibrazione nel tempo anche per l’eventuale raffinamento dei valori dei dati EO da GNSS-INS calcolati per i blocchi di produzione. Variazioni “sospette” dei *boresight angles* sono sintomatiche di problemi nei dati EO derivati da sistemi GNSS-INS e sono fonte di errori di georeferenziazione che, se non controllati, si propagano nei prodotti di restituzione (ortofoto, DSM e DTM, confronti altimetrici e Cartografia). Tali variazioni sospette possono indicare: a) una variazione permanente dell’orientamento relativo tra IMU e DMC, senza ulteriore aumento dei gradi di libertà della IMU rispetto al corpo camera, determinato ad esempio da un urto subito dal complesso DMC-IMU; b) un aumento dei gradi di libertà della IMU rispetto al corpo camera della DMC con conseguente variazione continua di posizione ed orientamento relativo IMU-DMC (ad esempio per difetti di fissaggio della IMU sul corpo camera o dovuto all’allentamento delle viti di fissaggio per le forti vibrazioni dei motori dell’aeromobile); c) malfunzionamenti in genere del POS-AV 510. In quest’ultimo caso gli errori introdotti nei dati EO non sono necessariamente tutti di tipo sistematico e la “diagnosi” richiede maggiore attenzione. Per le acquisizioni su Stromboli i controlli di stabilità dei parametri di calibrazione sono stati eseguiti confrontando i parametri calcolati processando tutto il blocco di Stromboli con i parametri ottenuti processando i dati di un volo di calibrazione eseguito il 15 giugno 2007 su poligono attrezzato nella zona della Riviera dei Cedri in Calabria. I residui dei dati EO (centri presa ed orientamenti) calcolati dopo *refinement* con CALQC sono riportati nella Fig. 5.

Photo ID	RX (Meter)	RY (Meter)	RZ (Meter)	ROmega (Deg)	RPhi (Deg)	RKappa (Deg)
min	-0,047	-0,049	-0,142	-0,003	-0,004	-0,012
max	0,040	0,034	0,088	0,006	0,003	0,013
media	0,000	0,000	0,000	0,001	-0,001	0,000
dev std	0,018	0,020	0,056	0,002	0,002	0,006

Fig. 5 – Statistiche dei residui sui dati EO del blocco di Stromboli 15 marzo 2007 ottenuti utilizzando CALQC ed il solo GCP “GPS_BASE”.

Le differenze angolari rilevate per i boresight angles nel confronto eseguito con modulo CALQC del POSPAC 4.31 (angoli Tx, Ty, Tz) sono risultate essere rispettivamente pari a 1, 1, 2 millesimi di primo sessagesimale ricadendo ampiamente entro i limiti di calcolo e risultando operativamente stabili, dimostrando una buona calibrazione eseguita dalla Ditta esecutrice dei voli. Il risultato del confronto è riassunto nella tabella in Fig. 6. L’analisi delle statistiche dei residui dei dati EO e il valore del *Datum Shift* dopo il processamento con introduzione e collimazione del punto “GPS_BASE” evidenzia che la traslazione rigida da applicare al blocco è di entità confrontabile con i valori dei residui sui centri presa e rispettivamente pari a -0.100, 0.022, 0.187 m nelle tre direzioni E, N, H_ell. Ciò esclude errori grossolani ma conferma che, pur calcolando la traiettoria del centro di presa applicando sia la tecnica D-GPS che lo *smoothing* inerziale alla stessa, non è possibile eliminare del tutto dalla traiettoria calcolata alcune residue “ambiguità cinematiche” (che poi si propagano fino ai dati EO) se non utilizzando un minimo numero di punti GCP. In ogni caso le differenze stimate con un unico GCP sono risultate essere limitate e tutte al di sotto di 10 cm in planimetria e 20 cm in quota.

Complessivamente i risultati ottenuti possono essere ritenuti soddisfacenti e si può affermare che l’integrazione del POS-AV 510 su DMC e l’utilizzo dei software proprietari in dotazione ai sistemi consente una notevole accelerazione della produzione fotogrammetrica; il modulo CALQC del software POSPAC 4.31 di Applanix consente di ottenere buoni risultati anche senza ricorrere a softwa-

re di terze parti. In futuro saranno condotte ulteriori analisi di confronto tra risultati ottenuti con modulo CALQC del POSPAC e risultati ottenuti con stazioni fotogrammetriche di fascia alta.

Project Configuration	Parameter Value
Number of photos:	38
Number of strips:	3
Number of GCPs:	1
Number of Check Points:	0
Number of tie/pass pts:	166
Degrees of freedom:	842
Focal length(mm):	120.000
Principal Point Offset in x (mm):	0.000
Principal Point Offset in y (mm):	0.000
Image measurement x SD (mm):	0.009
Image measurement y SD (mm):	0.009
Minimum Ground Parallax (Meter):	0.000
Maximum Ground Parallax (Meter):	0.253472222
Kappa Cardinal Rotation (Deg):	180.000
Nominal Photo Centre SD (Meter):	0.150 0.150 0.200
Nominal IMU Angle SD (Deg):	0.008 0.008 0.016
Nominal GCP SD (Meter):	0.050 0.050 0.050 ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$)

Boresight Angles (Arcmin) EX ANTE (calibrazione: 15-06-2007)	(Tx, Ty, Tz)
	1.227 -0.684 23.896
Calibration Result	Parameter Value
Number of Iterations:	3
RMS of GCP Residuals(Meter): N/A (1 solo GCP)	-
RMS of Check Points Residuals(Meter): No Check Points	N/A
Datum Shift X,Y and Z(Meter):	-0.100 0.022 0.187
RMS of image coord residuals(mm):	0.002 0.002
RMS of Ground Parallax(Meter):	0.058
RMS of Photo centre residuals(Meter):	0.018 0.019 0.054
RMS of Photo Angular residuals(Deg):	0.003 0.002 0.006
RMS of IMU residuals(Arcmin):	0.165 0.123 0.374
Boresight Angles(Arcmin): EX POST (verifica 15-03-2007)	(Tx, Ty, Tz)
	1.226 -0.683 23.894

Fig. 6 – Risultati del CALQC sul blocco di immagini DMC di Stromboli del 15/03/2007

Riferimenti bibliografici

- Cramer M. (2008), “The EUROSDR approach on digital airborne camera calibration and certification”, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVII. Part B4, Beijing 2008, 1753–1758
- Honkavaara E. et al. (2008), “A Permanent Test Field for Digital Photogrammetric Systems”, *Journal Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, N.1, January 2008, Vol. 74, 95-106
- Passini R., Jacobsen K. (2008), “Accuracy analysis of large size digital aerial cameras”, *Proceedings ISPRS Congress, Beijing 2008*, Vol. XXXVII, Part B1 Commission I WG I/4, 507-513
- Stensaas G., Lee G. (2008), “Driving towards a worldwide acceptance procedure for digital airborne sensors”, *Proceedings of the XXI Congress of The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*
- Stensaas G., Y.G. Lee G., Christopherson J. (2008), “The USGS Plan for Quality Assurance of Digital Aerial Imagery”, Draft version 0.9
- Cramer M. (2007), “The EuroSDR performance test for digital aerial camera systems”, *Photogrammetric Week 07*, Fritsch ed., Wichmann, Heidelberg, 89-106
- Kraus K. (2007), *Photogrammetry*, 2nd edition, de Gruyter, Berlin & New York, 459
- Cramer, M. (2007), “European Digital Airborne Camera Certification – EuroDAC²”, Position Paper, *EuroSDR Science and Steering Committee Meeting*, Rotterdam, The Netherlands
- Schroth R.W. (2007), “Large format digital cameras for aerial survey of geospatial information”, *FIG Working Week 2007*, Hong Kong SAR, 13-17 May 2007, China