L'ORTOFO DIGITALE DELLA PIANA DI SARAJEVO, ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI SENZA L'APPOGGIO A TERRA

Bruno ASTORI (*), Filiberto CHIABRANDO (*)

(*) Politecnico Di Torino Facoltà di Architettura 2, DINSE, Viale Mattioli 39 10122-Torino, 011-5644380, bruno.astori,filiberto.chiabrando@polito.it

Riassunto
A seguito della collaborazione tra il Dipartimento di Scienze e Tecniche per i Processi di Insediamento e la Compagnia Generale Riprese Aeree di Parma, è stato progettato ed eseguito un volo fotogrammetrico, con la camera digitale Leica ADS 40, sulla zona di Sarajevo in Bosnia Herzegovina; tale volo è costituito da tre strisciate con ricoprimento trasversale pari al 50% e quota relativa 6000 m (dimensione del pixel a terra di 60 cm).
Obiettivo del presente lavoro è quello di valutare le precisioni ed i risultati ottenibili per la realizzazione di cartografia fotografica a media scala (1:5000), utilizzando esclusivamente i dati provenienti dal sensore inerziale associato a tale camera, non prevedendo l'utilizzo dei dati relativi a misure GPS parzialmente già eseguite sulla zona.
La procedura seguita ha previsto l'utilizzo di tre software commerciali che consentono la gestione e l'utilizzo dei dati ADS 40: GPro, ORIMA e Leica Photogrammetric Suite.
Una volta ottenuta l'ortofotocarta sono stati eseguiti una serie di confronti, con la cartografia preesistente sull'area (per la zona di Sarajevo è stata utilizzata la carta fotogrammetrica a scala 1:5000, realizzata negli anni '80).
Grazie a tale supporto è stato possibile, una volta misurate le coordinate planimetriche di punti omologhi presenti su entrambe le rappresentazioni cartografiche, valutare le precisioni ottenute a seguito del processo di generazione dell'ortofotocarta.

Abstract
In Sarajevo (BiH) the Compagnia Generale Riprese Aeree di Parma in cooperation with DINSE - Polytechnic of Turin- did a Photogrammetrich flight at 6000 m relative height and pixel ground sampling distance 60 cm with the new digital camera Leica ADS 40.
Objective of the work is to estimate the precisions for the realization of orthophoto, medium-small scale (1: 5000-1: 10000) using exclusively the data from the associated inertial sensor.
Three commercial software were used in the generation of the map: GPro, ORIMA and Leica Photogrammetric Suite.
After that some comparisons, were did to estimate the obtainable precisions, thanks to the old 1:5000 scale cartography.

Il Volo Fotogrammetrico

Per la realizzazione del volo fotogrammetrico, in stretta collaborazione con la CGR di Parma, si è utilizzata la camera fotogrammetrica digitale Leica ADS 40 (Sandau, 2000) di proprietà della ditta. A titolo informativo si riportano le principali caratteristiche della camera utilizzata per le riprese sulla zona analizzata:

- FOV: 64° (angolo di apertura);
- angoli stereoscopici: 14°, 28° e 42°;

- luminosità: f/4 fisso;
- lunghezza focale: 62,77 mm;
- 2 Sensori CCD lineari pancromatici da 2 x 12.000 pixel ciascuno, sfalsati di 3,25 µm (in posizione 14 ° BW e 28° FW);
- 3 sensori CCD lineari multispettrali da 12.000 pixel ciascuno, per la banda del visibile in posizione (NADIR) e infrarosso vicino (in posizione 14° FW);
- dimensione del pixel: 6,5µm x 6,5 µm;
- risoluzione radiometrica: 12 bit;
- GPS/IMU integrato.

Fig. 1 Camera Leica ADS 40

In fase di progetto si era pensato di realizzare tre strisciate (fig. 2) ad una quota relativa pari a 6000 m, con dimensione del pixel a terra pari a 60 cm; viste le condizioni atmosferiche non del tutto ideali per la realizzazione del volo (al momento del decollo da Trapani non vi erano nuvole sulla zona di Sarajevo; una volta arrivati sui luoghi, nel giro di poco tempo le condizioni atmosferiche sono peggiorate), non è stato possibile completare del tutto le operazioni di ripresa e su quelle eseguite si ha la presenza di alcune piccole nuvole. In particolare, rispetto alle tre strisciate previste dal piano di volo, ne sono state eseguite solamente due e mezzo (la prima, senza la presenza di nuvole, la seconda in parte disturbata dall'arrivo delle prime nuvole e la terza, visto il costante peggioramento delle condizioni atmosferiche, è stata interrotta dopo la ripresa di circa metà territorio rispetto a quello previsto in fase di progetto).

Per un corretto utilizzo del GPS/IMU è stata utilizzata come stazione di riferimento per le operazioni di georeferenzazione delle immagini acquisite durante il volo, la stazione GPS permanente dell'Università di Sarajevo, gestita dalla Prof. M.Mulic del Dipartimento di Geomatica della Facoltà di Ingegneria Civile.
Per le operazioni di ripresa, in accordo con le autorità locali, il volo non ha previsto lo scalo a Sarajevo.

Fig. 2 Piano di volo sulla zona di Sarajevo

Trattamento dei dati

I programmi necessari per la realizzazione del processo che porta alla generazione dell'ortofotocarta (fatta eccezione per il *post-processing* dei dati GPS/IMU eseguito con POSPROC), sono i seguenti:

- GPro, utilizzato:
  - per il trasferimento dati dalla memoria della camera a quella della stazione fotogrammetrica;
  - per la correlazione tra i dati GPS e le immagini acquisite (Livello 0);
  - per il ricampionamento delle immagini stesse (Livello 1);
  - per *l'Automatic Point Matching* (riconoscimento automatico di punti sulle diverse immagini);
  - per la realizzazione dell'ortofotoproiezione della zona ripresa (Livello 2);
- ORIMA, necessario per le operazioni di triangolazione aerea;

- Leica Photogrammetric Suite (LPS), fondamentale per la realizzazione e l'*editing* del modello digitale del terreno.

E' utile sottolineare l'espressione **programmi necessari**, in quanto una caratteristica peculiare dei dati che provengono dalla camera ADS 40 è quella che lega strettamente le varie elaborazioni a cui devono essere sottoposti tali dati.
Il legame nasce da tutta una serie di file accessori che ogni singolo software genera durante il processo fotogrammetrico e dall'utilizzo degli stessi per i passaggi successivi; la mancanza di un solo file non consente di proseguire con le elaborazioni delle immagini acquisite.
Infatti, dalle esperienze da noi finora svolte è risultata necessaria la disponibilità di tutti i programmi sopra citati.
Non è intenzione in questa breve trattazione focalizzare l'attenzione sull'utilizzo di GPro, in quanto le operazioni quasi del tutto automatiche non consentono all'operatore di interagire sulle azioni svolte dal programma. Pare comunque opportuno aprire una parentesi sul passaggio dal Livello 0 (immagine realmente acquisita dal/dai sensori) al Livello 1 (ricampionamento immagini ed effettiva fruibilità delle stesse).
Tale elaborazione comporta già un primo importante trattamento dei dati originali, che affronteranno tutti i successivi passaggi per poi concludersi con la realizzazione dell'ortofotoproiezione.
Alla luce delle considerazioni precedenti è necessario porsi una domanda: il processo seguito consente all'immagine originale di conservare effettivamente tutte le proprietà definite dalla geometria di presa e dalle caratteristiche intrinseche della camera o viene già in parte radicalmente cambiata?
Questo problema, che nasce dalle prime esperienze eseguite sulle caratteristiche dei dati provenienti dalla camera digitale Leica ADS 40 per il momento non è ancora stato analizzato nei particolari ed è oggetto di discussione e studio all'interno del gruppo di ricerca; si stanno eseguendo diverse prove per verificare le caratteristiche e le differenze tra i due Livelli L0 ed L1.
Come visto in precedenza, il lavoro presentato intende affrontare le problematiche relative alla realizzazione del raddrizzamento differenziale senza utilizzare i dati relativi alla misure eseguite sul terreno servendosi esclusivamente degli elementi provenienti dal GPS/IMU (centri di presa) associati a punti omologhi automaticamente identificati dal programma GPro.
Sarà quindi analizzato nei particolari il software ORIMA che consente, anche senza l'appoggio a terra, l'esecuzione delle operazioni di triangolazione aerea..

Triangolazione aerea
Nella camera digitale Leica ADS 40 della CGR di Parma i sensori utilizzati sono montati in direzione Forward (pancromatico), Backward (pancromatico) e Nadir (RGB:red,green,blue) rispetto alla direzione del volo (fig. 3). Chiamando ogni linea scansionata "scena", è possibile affermare che ogni "scena" è simile ad un'immagine proveniente da una *frame-camera* (la differenza sostanziale consiste nel fatto che una camera tradizionale, digitale e non, si acquisisce da un unico centro di presa una porzione di territorio che nella camera digitale Leica, sistema a sensori lineari multipli, è acquisito da più centri di presa); il GPS ed il sensore inerziale, incorporati nel corpo della camera, misurano di continuo durante il volo la posizione della camera stessa.
Durante il processo di triangolazione si utilizzano i sei parametri geometrici del GPS/IMU eseguendo il concatenamento secondo i principi del *bundle adjustment*.
In altre parole il programma fa uso, ad intervalli prefissati lungo la direzione del volo dei dati relativi al GPS/IMU, simulando la triangolazione che avrebbe luogo nel caso di camera tradizionale.
Lungo la direzione della strisciata vengono utilizzati pertanto diversi centri di presa; tali punti che d'ora in avanti chiameremo punti "fissi", normalmente sono posizionati uno rispetto all'altro ad una distanza pari al minore abbracciamento ripreso dalla camera (Fig.3).

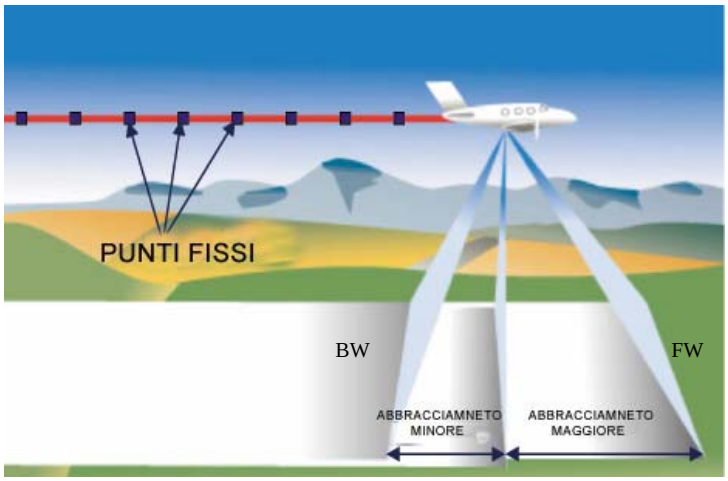

Fig. 3 Posizione dei punti "fissi"

I parametri presi in considerazione, ogni volta che viene determinato un punto "fisso" o punto di presa sono caratterizzati da:

- orientamento del sensore in quel determinato momento;
- la distanza tra un punto fisso ed il successivo (per avere le migliori condizioni geometriche deve essere non inferiore al minore abbracciamento);
- l'intervallo tra due punti fissi dipende dalle migliori condizioni del sensore inerziale (IMU);
- i sei parametri geometrici per ogni punto fisso sono aggiornati dal processo di triangolazione;
- ogni immagine ha più punti fissi.

Per quel che riguarda il modello matematico, è necessario utilizzare un algoritmo che sia in grado di mettere in relazione un punto dal sistema terreno a quello dei punti "fissi" presi in considerazione per il *bundle adjustment*.
Le coordinate immagine sono espresse in funzione dei punti a terra (P_i), automaticamente individuati dal programma, e dei parametri di orientamento dei due punti "fissi" più vicini (K) e (K+1). Il modello matematico (Müller, 1991) utilizzato è il seguente:

$$x_{ij} = F_{ij}(X_i, Y_i, Z_i, X_k, Y_k, Z_k, \omega_k, \varphi_k, \kappa_k, X_{k+1}, Y_{k+1}, Z_{k+1}, \omega_{k+1}, \varphi_{k+1}, \kappa_{k+1})$$

$$y_{ij} = G_{ij}(X_i, Y_i, Z_i, X_k, Y_k, Z_k, \omega_k, \varphi_k, \kappa_k, X_{k+1}, Y_{k+1}, Z_{k+1}, \omega_{k+1}, \varphi_{k+1}, \kappa_{k+1})$$

I parametri di orientamento sono calcolati in funzione dei punti fissi più un termine di correzione ($\delta X_j..\delta\kappa_j$) che è derivato dal GPS/IMU. Il coefficiente di interpolazione (c_j) è funzione della differenza di tempo tra due punti "fissi" vicini:

$$X_j = c_j K_k + (1 - c_j) X_{k+1} - \delta X_j$$

....

$$k_j = c_j \kappa_k + (1 - c_j) \kappa_{k+1} - \delta k_j$$

Infine i parametri di orientamento sono introdotti nelle ben note equazioni di collinearità.
Le equazioni risultanti sono quelle tipiche delle *frame-camera* (Hofmann,1982).

$$x_{ij} = -c\frac{r_{11j}(X_i - X_j) + r_{12j}(Y_i - Y_j) + r_{13j}(Z_i - Z_j)}{r_{31j}(X_i - X_j) + r_{32j}(Y_i - Y_j) + r_{33j}(Z_i - Z_j)}$$

$$y_{ij} = -c\frac{r_{21j}(X_i - X_j) + r_{22j}(Y_i - Y_j) + r_{23j}(Z_i - Z_j)}{r_{31j}(X_i - X_j) + r_{32j}(Y_i - Y_j) + r_{33j}(Z_i - Z_j)}$$

Tale modello è molto flessibile; risulta in effetti valida (metodologia da noi testata), in ampie zone di territorio dove o per motivi economici o per altre problematiche non è presente un insieme di punti di appoggio sufficientemente fitto, in quanto se non sono presenti punti di appoggio i parametri di orientamento vengono esclusivamente ricavati dai dati provenienti dal GPS/IMU. Oppure, in caso contrario, cioè quando non esistono parametri GPS/IMU i parametri di orientamento vengono ricavati esclusivamente dai punti misurati a terra.
Solitamente il sensore GPS/IMU ha un sistematico sfalsamento rispetto alla reale traiettoria del volo; tale errore viene compensato e calcolato grazie a parametri addizionali interni al processo di triangolazione (Hinsken et al.,2002). Alla fine dell'intero calcolo, tutte le posizioni del sensore durante l'acquisizione dei dati vengono interpolate tra le varie posizioni dei punti "fissi" utilizzati.
Per la zona da noi analizzata, in funzione delle caratteristiche del volo e delle informazioni derivate dal GPS/IMU sono stati utilizzati all'interno del *bundle adjustment* 76 punti "fissi" determinati automaticamente dal programma e circa 1250 "punti a terra", ottenuti dal processo di APM (*automatic point matching*) eseguito all'interno di GPro.
Dai risultati ottenuti al termine della triangolazione aerea eseguita con i dati a nostra disposizione si è proceduto con le operazioni che hanno portato alla realizzazione dell'ortofotoproiezione quali l'esecuzione e l'*editing* del modello digitale del terreno ed infine al processo di ortorettifica vero e proprio.

Realizzazione ed *editing* del DEM
Una volta ottenuto il blocco fotogrammetrico opportunamente triangolato, risulta necessario per effettuare un raddrizzamento differenziale l'utilizzo di un'opportuno modello digitale del terreno. Per eseguire tali operazioni, esistono ormai efficaci modelli matematici che, utilizzando i principi della geometria epipolare, consentono la realizzazione in tempi brevi di accurati DEM; nel nostro caso, come visto in precedenza, per la realizzazione di tale prodotto è stato utilizzato il software LPS (Chiabrando, 2006). La strategia utilizzata ha portato alla realizzazione di una TIN (*Triangulated Irregular Network*) sull'intera area comprendente la piana di Sarajevo; è inoltre utile sottolineare che, per avere una migliore corrispondenza tra l'effettivo andamento del terreno e il modello generato, in alcune aree (per le quali non risultava ottimale il DEM creato in modo automatico), si è proceduto manualmente alla sua realizzazione (sono stati collimati sull'immagine stereoscopica tutto un'insieme di punti utili ad una migliore realizzazione del modello).
Allo stesso modo durante le operazioni di *editing* si sono seguite sia procedure automatizzate che manuali per ottenere una superficie che meglio approssimasse l'effettivo andamento del terreno.

Ortofotoproiezione e confronti con la cartografia a scala 1:5000
Il passo successivo ha portato alla realizzazione del raddrizzamento differenziale sull'area analizzata. Per eseguire questo ultimo passaggio è stato utilizzato il software GPro che ha generato il Livello 2 corrispondente all'ultimo step di elaborazione possibile delle immagini provenienti dalla camera digitale Leica ADS 40.Per la realizzazione di tale prodotto è sufficiente associare all'immagine RGB il corrispondente modello digitale del terreno per ottenere attraverso il processo di calcolo l'esecuzione dell'ortofotoproiezione digitale.
Ottenuta quindi la cartografia fotografica di Sarajevo, per valutare l'effettiva correttezza dei dati metrici intrinseci alla stessa, è stato eseguito un confronto con la cartografia esistente a scala 1:5000, realizzata con metodo fotogrammetrico negli anni '80 sulla municipalità di Sarajevo.

Avendo a disposizione una copia cartacea della suddetta cartografia, per poter effettuare il confronto con l'ortofoto generata è stato necessario trattare in modo opportuno tale supporto cartaceo: scansione, correzione delle deformazioni e corretta georeferenziazione. Successivamente sono state misurante (all'interno di LPS) le coordinate di punti omologhi facilmente riconoscibili e presenti su entrambe le rappresentazioni cartografiche analizzate (figura 4). Alla luce dei risultati ottenuti (scarti tra coppie di punti omologhi), è possibile affermare che, dalle analisi finora eseguite su alcune zone test della città di Sarajevo (sono stati misurati circa un'ottantina di punti presenti su due elementi della cartografia a scala 1:5000 ed i corrispondenti identificati sull'ortofotocarta generata) ed i risultati hanno fornito valori che vanno da un minimo di 1 m ad un massimo di 1.6 m; il prodotto realizzato, rispetta sicuramente le tolleranze tipiche di una rappresentazione cartografica a scala 1:5000 ($\sigma = \pm$ 2m).
Oltre a proseguire i confronti sulla scala 1:5000, avendo a disposizione sia cartografia a scala maggiore (1:2500-1:1000), sia punti misurati direttamente sul terreno, oggetto dei lavori futuri sarà quello di valutare le effettive precisioni raggiungibili tramite l'utilizzo della metodologia precedentemente esposta per la realizzazione di ortofotocarte a medio grande scala.

Fig. 4 Porzione di ortofoto e cartografia corrispondente utilizzata per il confronto. Scala originale 1:5000

Bibliografia

Chiabrando F. (2006). "Metodologie innovative per il rilievo del territorio.", *Politecnico di Torino- Tesi di Dottorato- Tutor: Prof. B.Astori*

Hinsken L, Miller S, Tempelmann U, Uebbing R, Walker S. (2002). "Triangulation of LH Systems ADS40 imagery using Orima GPS/IMU", *Atti ISPRS commision III, Photogtrammetric Computer Vision, Graz, Austria*

Sandau R. (2000). "Design Principles of the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor". Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 33, Part B2, pp. 258-265, Amsterdam, The Netherlands.

Müller, F. (1991)."Photogrammetrische Punktbestimmung mit Bilddaten digitaler Dreizeilenkameras". Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 372, München, Germany.

Hofmann O, Navé P, Ebner H. (1982). "DPS A Digital Photogrammetric System for Producing Digital Elevation Models and Orthophotos by Means of Linear Array Scanner Imagery". *Int. Arch. of Photogrammetry, Vol. 24 Part B3, pp. 216-227, Helsinki, Finland.*