

VALUTAZIONE DELLA ACCURATEZZA DELLE IMMAGINI ADS40 IN FUNZIONE DEL MODELLO DI CAMERA E DELLA QUOTA DI VOLO

Vittorio CASELLA, Marica FRANZINI, Barbara PADOVA

DIET - Università di Pavia, Via Ferrata, 1 - 27100 Pavia - (vittorio.casella, marica.franzini, barbara.padova)@unipv.it

RIASSUNTO

Il lavoro concerne lo studio delle accuratezze ottenibili dalle immagini Leica ADS40. La ricerca è stata condotta utilizzando software commerciali quali Socet-Set ed Orima e dati acquisiti sul test-site di Pavia. In particolare sono stati presi in considerazione tre blocchi acquisiti nell'agosto 2004 a tre differenti quote di volo: 2000, 4000 e 6000 m. Sono state valutate diverse configurazioni caratterizzate da un numero variabile di punti di appoggio e da differenti strategie di triangolazione aerea.

ABSTRACT

The paper concerns an in-depth study of the attainable accuracy of Leica ADS40 imagery. The study has been carried out with the Socet-Set and ORIMA programs and takes advantage of the Pavia Test Site, where many artificial and natural, very well measured control points are available. Three flights are considered, having a relative height of approximately 2000, 4000 and 6000 meters. Different configurations are investigated, characterized by the usage of 5 and 12 GCPs. Finally, several adjustment strategies are analyzed: together with the basic adjustment model, the usage of additional parameters (such as datum transformation and re-estimation of IMU misalignments), as well as the camera self-calibration are taken into consideration.

1. Introduzione

La camera digitale aerea Leica ADS40 acquisisce le immagini nella modalità detta *push-broom*. Si tratta di una tecnica impiegata da decenni nei satelliti e comunque già applicata nei sensori aerei: si ricorda la camera HRSC del DLR, che può essere considerata la progenitrice delle moderne camera a linee. Tuttavia solo negli ultimi anni la tecnica *push-broom* si è diffusa massicciamente nei sensori aerei con la comparsa di diverse camere basate su tale tecnologia: la Leica ADS40, le varie camere HRSC-X, la Starlabo TLS, la Wehrli 3-DAS-1, la JAS.

L'uso delle camere a linee richiede la ridefinizione di alcune prassi e metodologie oramai consolidate nella fotogrammetria basata su immagini frame. In particolare è necessario approfondire temi quali: il modello di camera; la calibrazione della camera e la sua stabilità; la auto-calibrazione; i modelli di traiettoria; il contenuto informativo delle immagini; l'accuratezza delle misure. Lo studio delle prestazioni delle camere digitali aeree ed in particolare, la validazione rigorosa delle accuratezze ottenibili sono pertanto materie di grande interesse scientifico.

La nota descrive una sperimentazione condotta su immagini ADS40, acquisite a tre diverse altezze, 2000, 4000 e 6000 m. La disponibilità di numerosi punti di controllo, molto ben misurati, rende le conclusioni particolarmente affidabili. Vengono descritti il poligono usato e i dati analizzati (Par. 2), la metodologia impiegata (Par. 3) e i risultati ottenuti (Par. 4).

2. Il test-site di Pavia e i voli utilizzati

Il test-site di Pavia è stato sviluppato negli ultimi 10 anni per supportare ricerche su lidar, fotogrammetria e GPS. Esso dispone di alcuni elementi specifici per la ricerca in fotogrammetria: 186 punti di controllo artificiali (AGCP) costituiti da quadrati bianchi di 35 cm di lato dipinti sulla pa-

vimentazione stradale o sui camminamenti pedonali; 50 punti artificiali di grandi dimensioni, aventi lato di 60 cm (BAGCP), creati a supporto della ricerca sulle immagini ADS40; 56 punti di appoggio naturali (NGCP) costituiti da dettagli del territorio facilmente individuabili sui fotogrammi aerei. Più recentemente, e successivamente all'esecuzione dei voli descritti nel presente articolo, sono stati realizzati altri 70 BAGCP.

La dimensione dei marker BAGCP è stata definita in modo da avere una soddisfacente visibilità alle tre quote di volo considerate, 2000, 4000 e 6000 m. Tutti i punti di appoggio sono stati misurati con GPS in modalità rapido-statica, utilizzando tre ricevitori fissi collocati su vertici della rete GPS di Pavia. La compensazione del rilievo ha prodotto accuratèzze inferiori al centimetro per ogni componente.

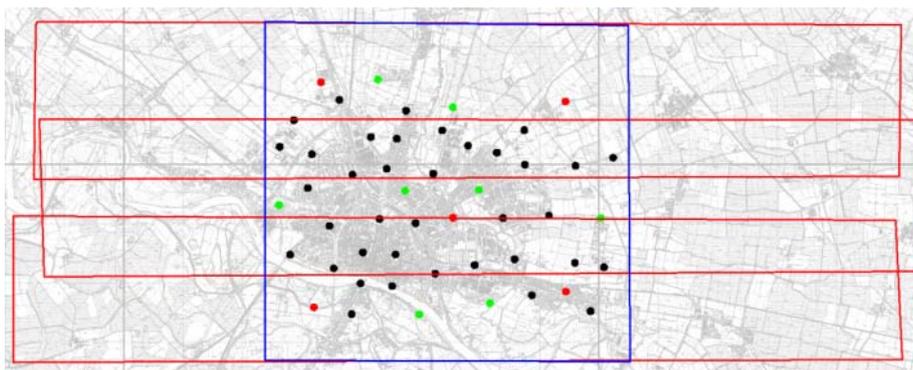


Figura 1. Geometria delle strisciate del volo a 2000 m e disposizione dei punti GCP/CKP.

Nell'agosto del 2004 sono stati acquisiti sopra il test-site di Pavia alcuni blocchi fotogrammetrici con una camera ADS40 alle altezze di volo 2000, 4000 e 6000 m; i voli sono stati realizzati dalla Compagnia Generale Riprese aeree (CGR) di Parma. Il volo si compone complessivamente di sette strisciate Est-Ovest: due per il volo più alto, due per il volo intermedio e tre per il più basso.

3. La metodologia

Lo studio delle accuratèzze è stato condotto utilizzando software commerciali: Socet-Set 4.4.1, GPro 2.1 ed Orima 6.1, nella stessa configurazione adottata da CGR. Per ogni quota di volo, vengono testati molteplici scenari che possono essere classificati secondo diverse caratteristiche.

- **Modalità con cui vengono determinati i parametri di orientamento esterno.** Viene preso in considerazione il *direct georeferencing* (DG), in cui i parametri di orientamento esterno determinati dal sistema GPS/IMU sono usati direttamente e lo *integrated sensor orientation* (ISO), in cui le misure GPS/IMU vengono inserite come osservazioni nella triangolazione aerea: gli scenari relativi a questo secondo caso sono detti BASIC e SELF, come viene spiegato successivamente. Nel primo caso (DG), i risultati sono stati ottenuti realizzando una triangolazione aerea nella quale le osservazioni derivanti dal sistema GPS/IMU sono state largamente sovrappesate in modo di mantenerle inalterate al termine della compensazione.
- **Numero di GCP.** Si considerano due configurazioni aventi 5 e 12 punti di appoggio.
- **Modello della camera.** Si prendono in considerazione i modelli detti BASIC e SELF. Il primo è il modello standard adottato da Socet-Set e Orima ed è basato sull'uso del modello nominale di camera e dei file di calibrazione periodicamente prodotti dal costruttore della camera. Il modello nominale è basato, in sintesi, sulle seguenti assunzioni: l'obiettivo non ha distorsioni; i sensori sono realmente lineari ed ortogonali all'asse x del sistema di riferimento immagine; i centri delle linee di sensori si trovano sull'asse x prima richiamato.

I programmi usati offrono tuttavia opzioni più sofisticate. È possibile stimare i 7 parametri di una trasformazione di datum utile nel caso in cui i dati GPS/IMU e i GCP utilizzati siano riferiti a due sistemi di riferimento differenti; è possibile ristimare i *boresight misalignment* tra camera e sistema inerziale. È infine possibile effettuare la *self-calibration*: il modello matematico uti-

lizzato è quello di Brown (Brown, 1976) e, sebbene esso sia stato originariamente pensato per le camere frame, è stato adattato ed implementato anche per le camere a linee. Allo scenario in cui si calcola la triangolazione aerea stimando i parametri della trasformazione di datum ed effettuando la *self-calibration* è stato dato il nome SELF.

4. I risultati ottenuti

Le accuratèzze sono state valutate tramite la comparazione tra le coordinate oggetto dei punti di controllo determinate per via fotogrammetrica con quelle derivanti dal rilievo topografico GPS; le prime sono state ottenute inserendo i punti di controllo, in qualità di punti di legame, all'interno della compensazione, in modo che la triangolazione aerea ne restituisse le coordinate oggetto. Si tratta dunque di misure fotogrammetriche ridondanti, alle quali contribuiscono in media 3-5 raggi, evidentemente meno disperse delle misure di modello singolo.

Le Tabelle 1, 2 e 3 mostrano i risultati rispettivamente per i blocchi a 2000, 4000 e 6000 m. Le macro-righe di ciascuna tabella corrispondono ai 5 scenari analizzati: DG, BASIC con 5 e 12 punti di appoggio, SELF con 5 e 12 punti di appoggio. Nella parte destra delle tabelle, le macro-righe sono suddivise in 4 righe riportanti i risultati per le componenti x , y , xy , e z ; la terza riga, xy , si riferisce agli errori planimetrici medi. Nel caso del eqm, ad esempio, si ha

$$eqm_{xy} = \sqrt{\frac{eqm_x^2 + eqm_y^2}{2}}$$

Nella seconda colonna si indica il numero di GCP e CKP usati e nella terza è riportato il σ_0 a-posteriori determinato dalla triangolazione aerea. Nella quinta colonna è indicata la deviazione standard teorica, ottenuta mediando i valori desunti dalla matrice di varianza-covarianza determinata nella compensazione: i tabulati del programma Orima indicano la sigma a-posteriori per le tre componenti di ciascuno dei CKP usati; mediando su tutti i CKP sono stati ottenuti i valori riportati in tabella. Le ultime tre colonne indicano i valori empirici di precisione ed accuratezza, ottenuti elaborando le differenze fra le coordinate fotogrammetriche e quelle GPS; sono indicate media, sqm (distanza media dalla media empirica) ed eqm (distanza media dal valore vero).

Quota di volo - 2000 m			Valori teorici	Valori empirici			
SET	GCPs/CKPs	Sigma0 [µm]	Comp.	sqm [m]	media [m]	sqm [m]	eqm [m]
DG	0 / 46	6,6	x	0,11	0,02	0,12	0,12
			y	0,11	-0,01	0,09	0,09
			xy	0,11			0,11
			z	0,28	-0,56	0,32	0,64
BASIC	5 / 41	2,6	x	0,05	0,09	0,22	0,24
			y	0,05	0,02	0,27	0,27
			xy	0,05			0,25
			z	0,12	-0,36	0,15	0,39
	12 / 34	2,8	x	0,05	0,04	0,21	0,22
			y	0,05	-0,01	0,22	0,22
			xy	0,05			0,22
			z	0,12	-0,26	0,11	0,28
SELF	5 / 41	2,3	x	0,05	0,02	0,05	0,06
			y	0,05	-0,01	0,04	0,04
			xy	0,05			0,05
			z	0,12	-0,03	0,08	0,09
	12 / 34	2,3	x	0,04	-0,01	0,06	0,06
			y	0,04	-0,01	0,04	0,04
			xy	0,04			0,05
			z	0,10	-0,01	0,06	0,06

Tabella 1. Risultati completi per il blocco a 2000 m

Quota di volo - 4000 m				Valori teorici	Valori empirici		
SET	GCPs/CKPs	Sigma0 [μm]	Comp.	sqm [m]	media [m]	sqm [m]	eqm [m]
DG	0 / 50	6,6	x	0,19	-0,14	0,29	0,32
			y	0,24	0,34	0,46	0,57
			xy	0,22			0,47
			z	0,52	-1,78	0,20	1,79
BASIC	5 / 45	3,1	x	0,10	0,06	0,25	0,26
			y	0,12	0,17	0,39	0,43
			xy	0,11			0,36
			z	0,27	-1,19	0,19	1,20
	12 / 38	3,2	x	0,10	0,06	0,30	0,31
			y	0,12	0,13	0,33	0,35
			xy	0,11			0,33
			z	0,27	-0,98	0,18	1,00
SELF	5 / 45	2,9	x	0,10	0,02	0,07	0,08
			y	0,12	0,03	0,06	0,07
			xy	0,11			0,07
			z	0,27	-0,05	0,10	0,11
	12 / 38	2,9	x	0,09	0,01	0,07	0,07
			y	0,11	0,01	0,05	0,05
			xy	0,10			0,06
			z	0,25	-0,05	0,10	0,12

Tabella 2. Risultati completi per il blocco a 4000 m

Quota di volo - 6000 m				Valori teorici	Valori empirici		
SET	GCPs	Sigma0	Comp.	sqm [m]	media [m]	sqm [m]	eqm [m]
DG	0 / 49	7,2	x	0,29	-0,31	0,33	0,45
			y	0,34	0,40	0,50	0,64
			xy	0,31			0,55
			z	0,80	-2,20	0,22	2,21
BASIC	5 / 44	3,3	x	0,15	0,04	0,27	0,27
			y	0,17	0,20	0,41	0,45
			xy	0,16			0,37
			z	0,39	-1,65	0,19	1,66
	12 / 37	3,3	x	0,14	0,05	0,34	0,34
			y	0,16	0,11	0,33	0,35
			xy	0,15			0,34
			z	0,38	-1,25	0,20	1,26
SELF	5 / 44	3,2	x	0,15	-0,05	0,08	0,09
			y	0,17	0,05	0,08	0,09
			xy	0,16			0,09
			z	0,40	0,03	0,17	0,17
	12 / 37	3,2	x	0,14	-0,02	0,07	0,08
			y	0,16	0,02	0,07	0,08
			xy	0,15			0,08
			z	0,38	-0,02	0,15	0,15

Tabella 3. Risultati completi per il blocco a 6000 m

Le Figure 1, 2 e 3 riassumono i risultati per i voli aventi altezza 2000, 4000 e 6000 m rispettivamente. In ascissa sono riportati i cinque scenari considerati DG, BASIC con 5 e 12 punti di appoggio, SELF con 5 e 12 punti di appoggio, mentre in ordinata è indicato lo eqm per le tre componenti est (in viola), nord (in verde) e quota (in azzurro). I valori di eqm sono normalmente indicati con punti aventi lo stesso colore delle linee. In alcuni casi il punto rappresentativo ha invece colore rosso: ciò indica che in quella configurazione la media degli scarti è significativa e che dunque il valore di eqm include un bias; la significatività è stata discussa con un test *t* con livello di significatività 5%. Vi sono anche punti di colore arancione nei casi dubbi, in cui la media degli scarti è significativa, in senso stretto, ma l'entità dei valori in gioco suggerisce prudenza nel trarre le conclusioni.

Per la valutazione delle accuratèzze ottenute è opportuno tenere presente che la dimensione del pixel a terra (GSD - *Ground Sampling Distance*) è di circa 20 cm per il volo a 2000 m, di circa 40 cm per quello a 4000 m e di circa 60 cm per il blocco volato a 6000m.

Negli scenari DG, l'accuratèzza planimetrica è attorno a 1 GSD mentre l'accuratèzza altimetrica è compresa fra 3 e 4 GSD; fa eccezione la planimetria del volo a 2000 m, la cui accuratèzza è 0.5 GSD e costituisce una anomalia.

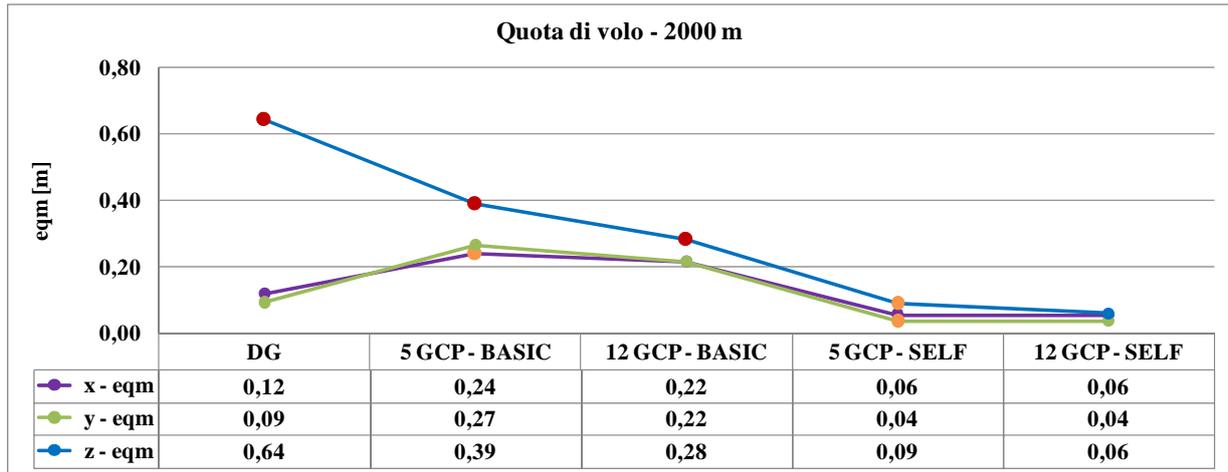


Figura 2. Accuratezze del blocco a 2000 m

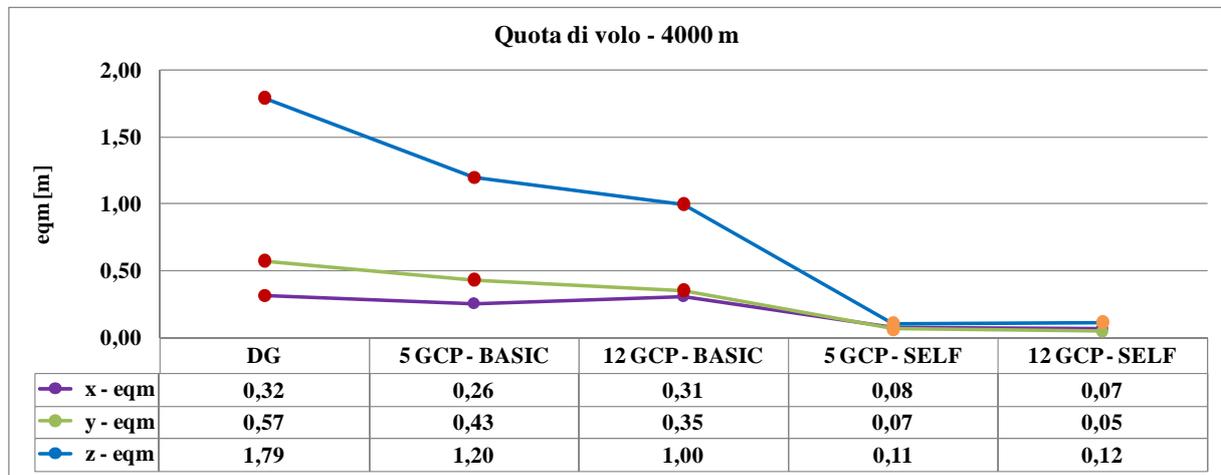


Figura 3. Accuratezze del blocco a 4000 m

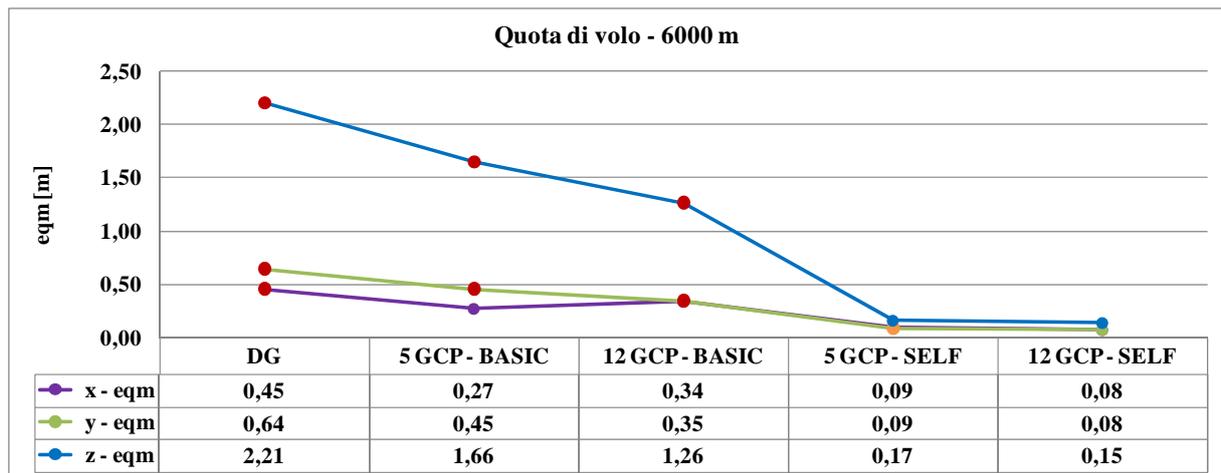


Figura 4. Accuratezze del blocco a 6000 m

Negli scenari BASIC l'accuratezza planimetrica è di poco superiore a 1 GSD per il volo a 2000 m, attorno a 1 GSD per il volo a 4000 m e vicina a 0.5 GSD per il volo a 6000 m. Per la componente altimetrica si hanno valori di accuratezza attorno a 2 GSD per il volo a 2000 m, prossimi a 3 GSD per il volo a 4000 m e compresi fra 2 e 3 GSD per il volo a 6000 m. L'uso di 12 GCP invece che 5 introduce in generale miglioramenti del 20-30%, anche se vi sono eccezioni.

Negli scenari SELF l'accuratezza planimetrica è attorno a 0.20 e 0.30 GSD per i voli a 2000 m e 4000 m e scende a 0.15 GSD per la quota 6000 m. L'accuratezza altimetrica è attorno a 0.3 GSD per i tre voli. Il passaggio da 5 a 12 GCP comporta miglioramenti limitati: in certi casi l'accuratezza resta in sostanza inalterata, in altri migliora di circa il 10%.

5. Conclusioni

Sono state valutate le accurattezze ottenibili dalle immagini ADS40 acquisite sopra il test-site di Pavia in funzione della quota di volo, 2000, 4000 o 6000 m, della modalità con cui vengono determinati i parametri di orientamento, DG o ISO, del numero di punti di appoggio utilizzati, 5 o 12, e del modello di camera adottato, BASIC o SELF.

Il *direct georeferencing* non consente di ottenere accurattezze soddisfacenti. Il calcolo della triangolazione aerea con il modello di camera BASIC non migliora significativamente le cose e non consente di raggiungere la qualità delle misure che ci si aspetta dalla fotogrammetria. L'introduzione della *self-calibration* migliora in modo drammatico i risultati e consente di avere accurattezze davvero molto buone. La *self-calibration* è indispensabile per ottenere misure fotogrammetriche di qualità.

6. Bibliografia

Casella, V., Franzini, M., Padova, B. (2007). Accuracy assessment of ADS40 imagery as a function of flying height and of aerial triangulation strategies. Atti del V simposio internazionale MMT, 29-31 maggio 2007, Padova, (pubblicato su CD).

Casella, V., Franzini, M., Padova, B. (2007). Valutazione della accuratezza delle immagini ADS40 in funzione della quota di volo e della strategia di triangolazione aerea. Atti del Convegno Nazionale SIFET 2007, 27-29 giugno 2007, Arezzo, (pubblicato su CD).

Cramer, M. (2006). The ADS40 Vaihingen/Enz geometric performance test. ISPR Journal of Photogrammetry and Remote Sensing , 60 (Issue 6), 363-374.

Kocaman, S., Zhang, L., Gruen, A. (2006). Self-calibrating Triangulation of Airborne Linear Array CCD Cameras. EuroCOW Workshop, 25-27 gennaio 2006, Castelldefels – Spagna (pubblicato su CD).

Casella, V., Franzini, M. (2005). La qualità radiometrica e geometrica della immagini ADS40. Atti del workshop congiunto AIT e SIFET sul Rilevamento Urbano da Piattaforma Aerea e Satellitare, 1-2 dicembre 2005, Mantova, (pubblicato su CD).

Casella, V., Franzini, M., Banchini, G., Basili, D., Gentili, G. (2005). La qualità radiometrica delle immagini ADS40 e la sua influenza sulla precisione di collimazione e di restituzione. Atti della IX Conferenza ASITA, 15-18 novembre 2005, Catania, (p. 625-628).

Casella, V., Banchini, G. (2004). Verifica della qualità metriche della camera Leica ADS40. Atti della VIII Conferenza ASITA, 14-17 dicembre 2004, Roma, (p. 1983-1988).

Hinsken, L., Miller, S., Tempelmann, U., Uebbing, R., Walker, S. (2002). Triangulation of LH Systems'ADS40 imagery using ORIMA GPS/IMU. Atti del simposio ISPRS commissione III, 9-13 settembre 2002, Graz, Austria, (pubblicato su CD).

Brown, D. C. (1976). The Bundle Adjustment - Process and Prospects. Presentazione invitata al XIII Congresso ISPRS commissione III. Helsinki.

7. Ringraziamenti

La ricerca descritta nel presente articolo è stata svolta nell'ambito del Progetto di Ricerca di Interesse Nazionale intitolato "Analisi, comparazione e integrazione di immagini digitali acquisite da piattaforma aerea e satellitare", cofinanziato del MIUR per l'anno 2005, avente come coordinatore nazionale il prof. Sergio Dequal del Politecnico di Torino.

Si ringrazia la Compagnia Generale Ripreseeree – CGR di Parma per aver gentilmente messo a disposizione le immagini utilizzate per lo studio.